

30-0105/001

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. DR.-ING. E. h. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F. S. ROSTÁSY

S c h l u ß b e r i c h t

zum Forschungsvorhaben B I 5 - 80 01 82 - 12

"Verbesserung der Dauerhaftigkeit von
Reaktionsharz - rißinjizierten Beton-
bauteilen durch Optimierung des Verbundverhaltens".

von

Prof. Dr.-Ing. K.P. Großkurth, Dipl.-Ing. J. Günther
Prof. Dr.-Ing. K. Kordina, Dipl.-Ing. G. Schellstede

Dezember 1984

B I B L I O T H E K
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Postsendungen:
Beethovenstraße 52, 3300 Braunschweig
Erfüllungsort und Gerichtsstand: Braunschweig

Fernsprecher: (05 31) 391 5431

Fernschreiber: 9 52 698 lbstb d
Telegrammadresse: MPA Braunschweig

Zur Vermeidung von Verzögerungen wird dringend gebeten, Zuschriften nur an das Institut zu richten, nicht aber an einzelne Mitarbeiter.

Inhaltsverzeichnis

0	Einleitung und Zielsetzung.....	1
1	Stand der Technik.....	2
2	Versuchsvorbereitungen.....	3
2.1	Versuchskörper.....	4
2.2	Rißerzeugung.....	4
2.3	Karbonatisierung.....	7
2.4	Festlegung der Schwingbreiten für die Schwellbelastung.....	11
2.5	Verdämmen der Risse.....	11
2.5.1	Einpreßöffnungen.....	12
3	Versuchsdurchführung.....	12
3.1	Versuchsplan.....	12
3.2	Erwärmte Oberfläche.....	16
3.3	Verpreßgerät.....	16
3.4	Verpreßmaterial.....	20
3.4.1	Harzformulierung 1.....	20
3.4.2	Harzformulierung 2.....	22
3.4.3	Harzformulierung 3.....	22
3.5	Behandlung der Feuchtrisse.....	23
3.6	Durchführung der Epoxidharzverpressung.....	23
3.7	Überlastungsversuch.....	25
4	Probenherstellung.....	29
4.1	Herstellung der Proben für die Raster- elektronenmikroskopie.....	29
4.2	Zusätzliche Proben.....	32
4.2.1	Proben ohne Überlastung.....	32
4.2.2	Zugproben.....	32

II

5	Ergebnisse.....	34
5.1	Äußerer Zustand der Proben.....	34
5.2	Zugversuche.....	34
5.3	Rißbreitenmessungen während des Verpressens bei Balken 3.....	34
5.4	Kontrolle der Karbonatisierungstiefen.....	41
5.5	Rasterelektronenmikroskopie.....	41
5.5.1	Trockene Risse.....	41
5.5.2	Karbonatisierte Risse.....	48
5.5.3	Nasse Risse.....	52
5.5.4	Risse in Beton mit Luftporenbildnerzusatz.....	59
5.5.5	Bewertung der Untersuchungsergebnisse.....	62
6	Zusammenfassung.....	63
7	Ausblick.....	64

Literaturverzeichnis

- /1/ Merkblatt für das Verpressen von Rissen mit Epoxidharzsystemen im Bereich von Spannglied-Koppelstellen; Fassung Mai 1980; Bundesminister für Verkehr
- /2/ Merkblatt "Anwendung von Reaktionsharzen im Betonbau", Teil 3.1: Füllen von Rissen im Beton, Stahlbeton und Spannbeton mit Reaktionsharzen (Fassung August 1981); Arbeitskreis "Beschichten von Beton", Deutscher Beton-Verein e.V.; Beton- und Stahlbetonbau 11/1981
- /3/ Kordina, K.; Blume, F.; Günther, J.: Schadensbehebung - Schließen von Rissen. Schlußbericht Nr. 4.1.2 zum BMFT-Bericht: Spätschäden an Spannbetonbauteilen - Prophylaxe, Früherkennung, Behebung -; Fa. Dyckerhoff + Widmann, München, 1983
- /4/ IBK Bauseminar: Epoxidharze in der Betontechnik, Kurzfassungen der Referate; Bauen mit Kunststoffen, H. 6, 1972
- /5/ Kern, E.: Dichten von Rissen und sonstigen Fehlstellen bei wasserundurchlässigem Beton. VDI-Bericht Nr. 295, 1978
- /6/ Delargey, R.P.: Repair of Bascule Bridge Pit using epoxy injection; Concrete international, September 1980
- /7/ Iványi, G.: Verpressen von Rissen mit feuchtem Untergrund; Bericht im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, 1983
- /8/ Kordina, K.; Günther, J.: Leistungsfähigkeit von Rißverpressungen; Veröffentlichung des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Okt. 1982
- /9/ Kordina, K.; Blume, F.: Dauerhaftigkeit von Kunstharzen und Kunstharzmörteln für die Sanierung von Massivbrücken; Schlußbericht zum Forschungsvorhaben: F.A. 15.026 R 75 H, Bundesminister für Verkehr, Okt. 1979

0 Einleitung und Zielsetzung

In bewehrten Betonbauteilen entstandene Risse sollten im Interesse der Dauerhaftigkeit der Bauwerke sicher und oft kraftschlüssig geschlossen werden. Deswegen werden konstruktive Reaktionsharz-Rißinjektionen in zunehmendem Maße von zahlreichen Spezialunternehmen mit als geeignet ausgewiesenen Reaktionsharz-Formulierungen durchgeführt. Über das Verbundverhalten und dessen Beeinflussung durch Verarbeitungs- und Werkstoffparameter ist gegenwärtig nur wenig bekannt. Die hieraus resultierende, mit den berechtigten Forderungen der Bauteilsicherheit kaum zu vereinbarende Lücke bedarf wegen der ständig wachsenden Bedeutung dieser Sanierungsmethode einer raschen Schließung.

Der Sanierungserfolg einer Reaktionsharz-Rißinjektion hängt in komplexer Weise von den Harzformulierungen und Verarbeitungsbedingungen ab. Zwar kann er meist mit Hilfe mechanischer Prüfmethoden festgestellt werden, die Ursache eines vorzeitigen Verbundverlustes ist jedoch in den Mikrobereichen der Adhäsionszonen selbst zu suchen und kaum mittels makroskopischer Untersuchungen zu ergründen. Hier wird durch den Einsatz der Rasterelektronenmikroskopie eine eindeutige Zuordnung zu den vielfältigen Einflußparametern erwartet. Besondere Berücksichtigung sollen Feuchtigkeits- und Temperaturverhältnisse, der Einfluß karbonatisierter Rißflanken sowie der Bauteilbelastung während des Verpreßvorgangs und der Aushärtungsphase des Reaktionsharzes finden.

Die notwendigen Versuche sollten in Anlehnung an das "Merkblatt für das Verpressen von Rissen mit Epoxidharzsystemen im Bereich von Spannglied-Koppelstellen" /1/ durchgeführt werden. Da dieses ausweislich seines Geltungsbereichs auf Epoxidharzsysteme beschränkt ist, wurden neben einem zu Vergleichszwecken ausgewählten, für die Rißverpressung zuge-

lassenen Epoxidharz in Abstimmung mit dem Harzhersteller zwei weitere Epoxidharzsysteme in das Versuchsprogramm aufgenommen, die eine bessere Wasserverträglichkeit aufweisen, sich jedoch in ihrer Reaktivität unterscheiden.

1 Stand der Technik

Als Verpreßmaterial gelangen seit Mitte der 50er Jahre, insbesondere bei feinen Rissen, zunehmend flüssige Kunststoffsysteme zum Einsatz. Sofern kraftschlüssige Rißverschlüßungen angestrebt sind, handelt es sich überwiegend um Epoxidharzsysteme. In Fällen, in denen es nur um die Rißabdichtung geht, werden vielfach auch Systeme auf Polyurethan- oder Acrylharzbasis eingesetzt.

Seit Mai 1980 regelt das o.g. Merkblatt /1/ des Bundesministers für Verkehr das Verpressen von Rissen mit Epoxidharzen im Bereich von Spannglied-Koppelstellen. Es enthält konkrete Anforderungen an Qualität und Eignung von Harzen und Verpreßverfahren sowie an Ausführung und Überwachung der Verpreßarbeiten. Für das Füllen anderer Risse in Betonbauwerken existiert seit August 1981 ein DBV-Merkblatt /2/, das neben den Epoxidharzen auch andere geeignete Reaktionsharze zuläßt.

Im Rahmen eines umfangreichen Statusberichtes wurde von Kordina, Blume und Günther /3/ der Kenntnisstand aus mehr als 80 in- und ausländischen Veröffentlichungen erarbeitet. Hieraus läßt sich zusammenfassend schlußfolgern, daß bei fachgerechter Durchführung der Verpreßarbeiten unabhängig von der angewendeten Verpreßtechnologie die Eignung und Dauerhaftigkeit von Epoxidharzen für solche Fälle als nachgewiesen anzusehen ist, wo sich die Rißbreite beim Verpressen nur unerheblich ändert, die Risse allseitig zur Injektion zugänglich und frei von Wasser in flüssiger Form sind.

Beim Verpressen nasser Risse ist i.a. mit einer vergleichsweise geringeren Haftfestigkeit des Harzes an den Rißflanken zu rechnen /4/, /5/. Während sich nach Delargey /6/ unter bestimmten Bedingungen offenbar auch wassergefüllte Risse mit Epoxidharz befriedigend kraftschlüssig verpressen lassen, hat Iványi /7/ mit Hilfe von Balkenversuchen geringere Haftfestigkeiten bei allen überprüften Epoxidharzen festgestellt.

Herrschten während der Verpreß- und Aushärtephase geringere verkehrsbedingte Rißbreitenänderungen um 0,03 mm vor, wurde keine negative Auswirkung auf das Verbundverhalten beobachtet /8/. Positive Ergebnisse erbrachten auch die Grundsatzprüfungen nach dem Merkblatt /1/, das Rißbreitenänderungen von 0,05 mm vorsieht.

Über Langzeitversuche wird in der Literatur kaum berichtet. Kordina und Blume /9/ haben einen Betonbalken, dessen trockene Risse ohne Belastung mit EP-Harz verpreßt wurden, langfristig im Freien gelagert und dabei einer Dauerlast unterworfen. In einem Überlastungsversuch ergab sich kein signifikant unterschiedliches Tragverhalten von verpreßtem Balken und ungerissenem Vergleichsbalken.

2 Versuchsvorbereitungen

Da zur Abdeckung des Spektrums der Harzformulierungen drei verschiedene Epoxidharzsysteme ausgewählt wurden, und je Versuchskörper ein Harz untersucht werden sollte, ergab sich die Herstellung von drei Stahlbetonbalken.

Wie Tabelle 1 zeigt, unterlagen die drei Versuchsbalken hinsichtlich der Versuchsvorbereitung und -durchführung dem gleichen Zeitplan.

2.1 Versuchskörper

Die Wahl der Versuchskörper (Bild 1) erfolgte in Anlehnung an das "Merkblatt für das Verpressen von Rissen mit Epoxidharzsystemen im Bereich von Spannglied-Koppelstellen".

Bei einer Stützweite von 4,00 m betrugen die Abmessungen $b/d = 30/60$ cm. Im mittleren Bereich wurde der Verbund zwischen Längsbewehrung und Bügeln unterbrochen, um die Rißbildung zu begünstigen.

Die linke Balkenhälfte wurde ohne den Zusatz eines LP-Mittels, die rechte Balkenhälfte mit diesem Zusatz einen Tag später anbetoniert. Die rauh abgeschaltete Fuge in Balkenmitte ermöglichte so den direkten Vergleich der beiden Betone.

Zur Kontrolle der Bauwerkstemperatur wurden Thermoelemente gemäß Bild 2 im Balken angeordnet.

Die Betongüte entsprach einem B 35. Alle betontechnologischen Daten enthält Tabelle 2.

2.2 Rißerzeugung

Die Erzeugung der zu verpressenden Risse erfolgte 14 Tage nach der Herstellung des Balkens. Dazu wurde der Balken durch Einzellasten in den Drittelpunkten stufenweise belastet (Bild 3) bis mindestens sechs Risse je Balkenhälfte $\geq 0,2$ mm entstanden. Die Last, bei der dieser Zustand erreicht war, wird im folgenden mit Oberlast bezeichnet. Diese lag zwischen 135 und 140 kN/Presse und in jedem Falle weit über der rechnerischen Gebrauchslast nach DIN 1045 mit 96 kN/Presse. Dabei hatten die größten Risse eine Rißbreite von 0,4 bis 0,5 mm.

Betonalter [Tage]			Maßnahme
Balken 1	Balken 2	Balken 3	
0	0	0	Betonage der linken Balkenhälfte ohne LP-Zusatz
1	1	1	Betonage der rechten Balkenhälfte mit LP-Zusatz
14	14	14	statische Erstbelastung zwecks Rißerzeugung
16	16	15	4 Risse für die CO ₂ -Begasung verdämmt
17	17	16	Beginn der CO ₂ -Begasung
41	35	35	Ende der CO ₂ -Begasung
42	35	35	Festlegung der Schwingbreite unter Schwellbelastung
44	38	36	restliche Risse verdämmt
45	41	37	Verpressen der Risse unter Schwellast
49	45	41	Verpressen der Risse unter statischer Last
53	49	45	Überlastungsversuch
anschließend			Bohr- und Sägearbeiten

Tabelle 1: Versuchsablauf

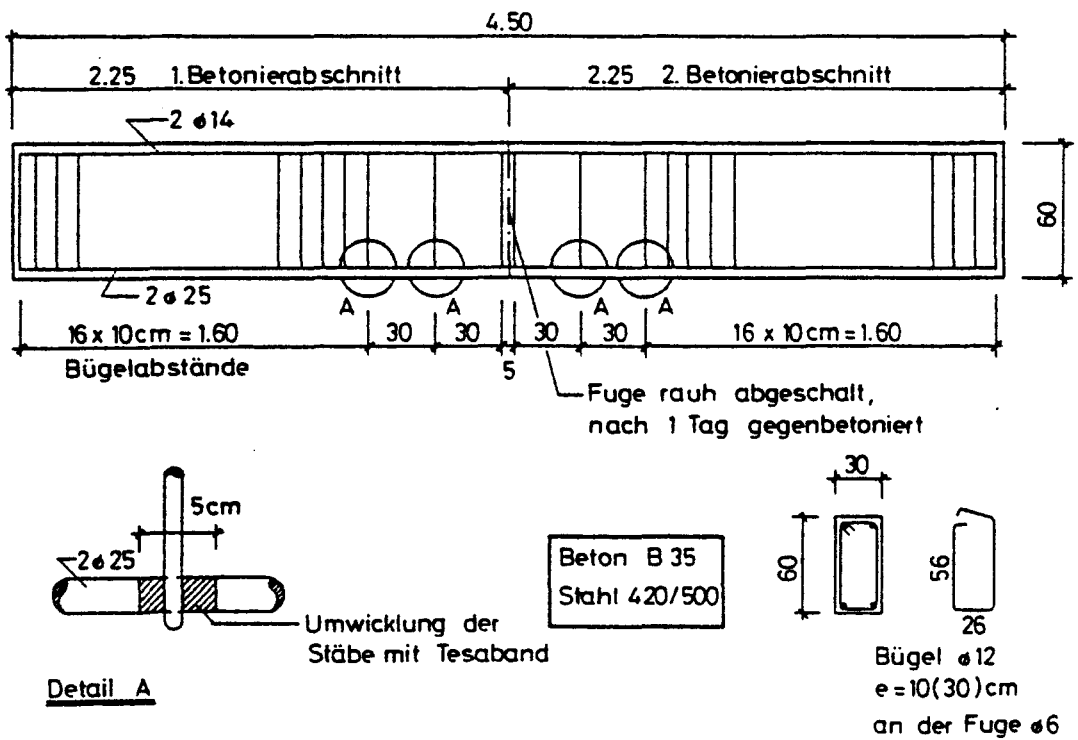


Bild 1 : Bewehrungsplan

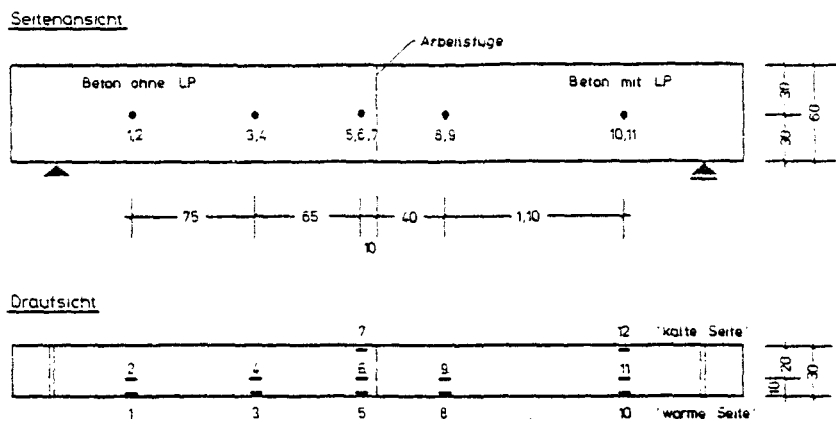


Bild 2 : Anordnung der Thermoelemente

Versuchs- balken Nr.	Betonage- Datum	LP- Gehalt am Frischbeton	Würfelfestigkeiten [N/mm ²]		Festigkeiten bei Versuchsbeginn [N/mm ²]			
			Versuchsgeg.	28 Tage	Spaltzug-	Biegezug-	Prismendruck-	E-Modul
1	05.04.83	3,1 %	37 (14)	45	2,95 (14)	3,69 (14)	30 (15)	25 500 (15)
	06.04.83	6,4 %	34 (13)	39	2,43 (13)	3,53 (13)	25 (14)	23 600 (14)
2	25.10.83	2,6 %	41 (14)	45	3,16 (14)	3,64 (14)	31 (14)	25 500 (14)
	26.10.83	6,1 %	35 (13)	42	3,15 (13)	2,58 (13)	28 (14)	24 900 (14)
3	18.01.84	3,2 %	41 (14)	48	2,78 (14)	3,03 (14)	32 (14)	25 200 (14)
	19.01.84	5,6 %	37 (13)	42	2,37 (13)	2,98 (13)	28 (13)	23 900 (13)

Tabella 2: Betonfestigkeiten
()-Werte = Betonalter in Tagen

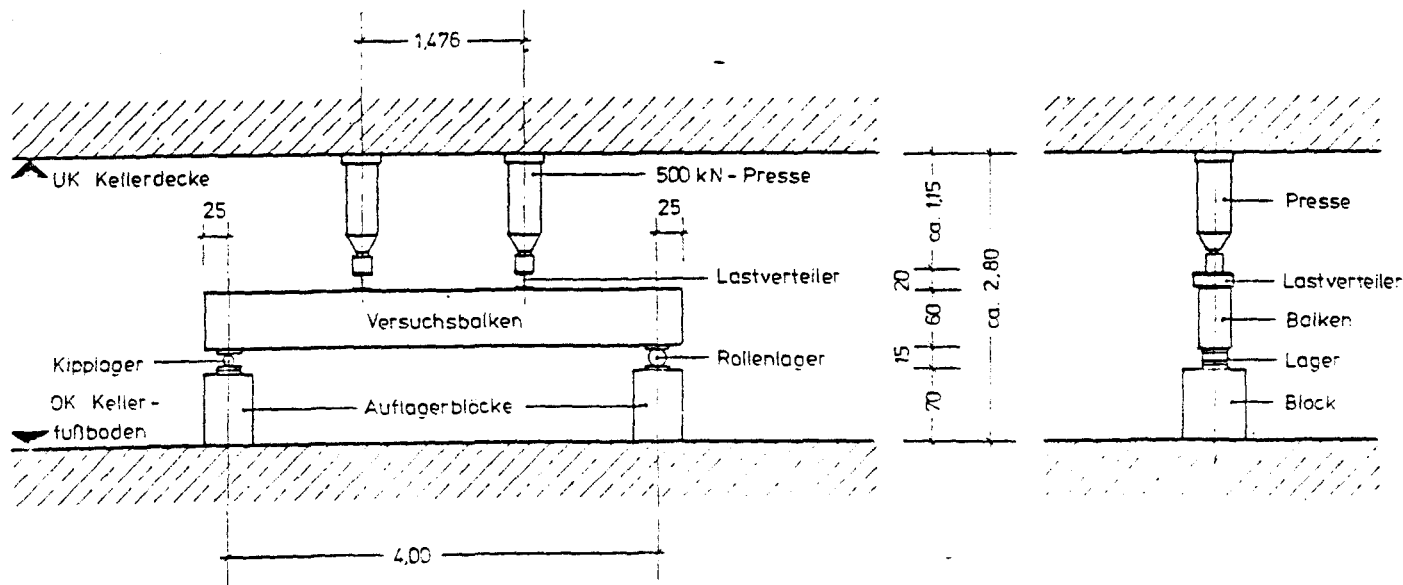


Bild 3 : Versuchsaufbau

Von den bis zu einer Höhe von 40 cm entstandenen Rissen wurden 14 bis 16 für das Verpressen ausgewählt. Die Risse sind in den Bildern 4 bis 6 dargestellt.

Die Risse wurden mittels einer Videokamera auf einen Bildschirm übertragen, auf dem die Rißbreite bei einer Vergrößerung von 37,3:1 genau gemessen werden konnte.

2.3 Karbonatisierung

Zwei Risse je Balkenhälfte wurden unter der halben Oberlast mit je 3 Packern pro Balkenseite versehen und verdämmt. Die halbe Oberlast wurde gewählt, um die Elastizitätsgrenze des Verdämmmaterials möglichst nicht zu überschreiten.

Nach der Entlastung erfolgte die Begasung dieser Risse mit CO_2 , das in die Rißvorderseite hinein- und aus der Rißrückseite hinausgeblasen wurde; danach geschah der gleiche Vorgang in umgekehrter Richtung.

Die Dauer dieser Begasung betrug insgesamt 3 Wochen, wobei je Riß etwa 2000 l CO_2 hindurchströmten. Vorversuche ergaben, daß diese Menge ausreichte, um die Rißufer mehrere Millimeter tief zu karbonatisieren.

Die Durchströmungsrichtungen des CO_2 zeigt Bild 7.

Die Durchströmungsmengen wurden durch ein Ventil an der CO_2 -Flasche geregelt. Die Kontrolle erfolgte durch aufsteigende Bläschen in einer Dose mit Wasser, in die der abgehende Schlauch mit dem durchströmten Gas mündete.

Die durchströmten Gasmengen sind in den Tabellen 3 bis 5 enthalten.

Da während der 3 Wochen Karbonatisierungsdauer der Balken nicht unter Last stehen konnte, wurden für die Karbonatisierung die größten Risse ausgesucht.

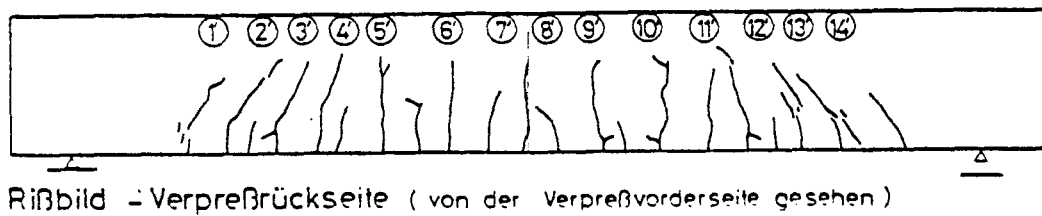
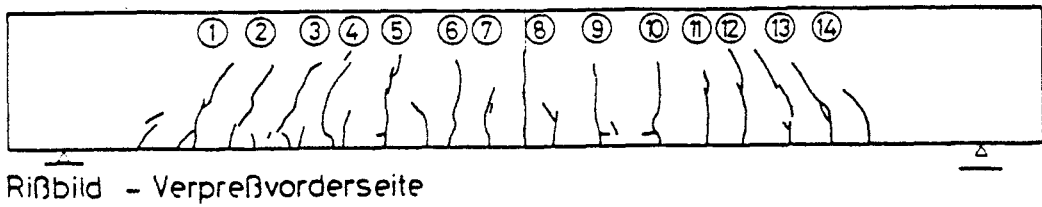


Bild 4 : Rißbild vor dem Verpressen, Balken 1

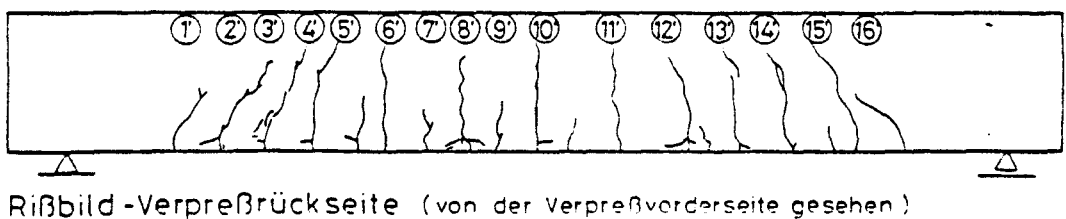
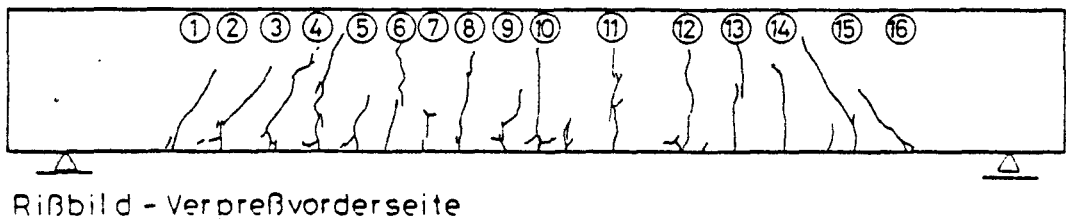
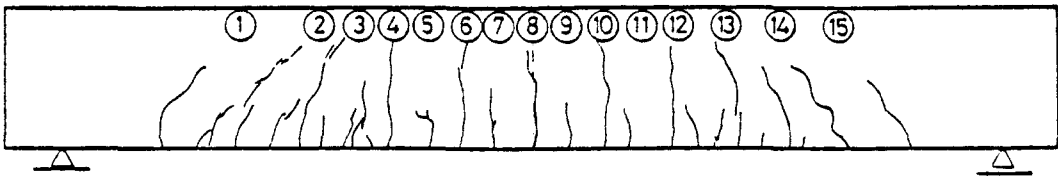
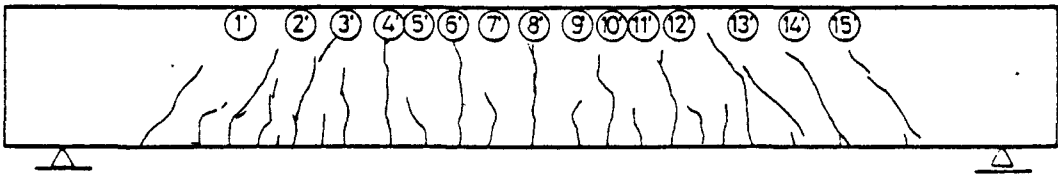


Bild 5 : Rißbild vor dem Verpressen, Balken 2

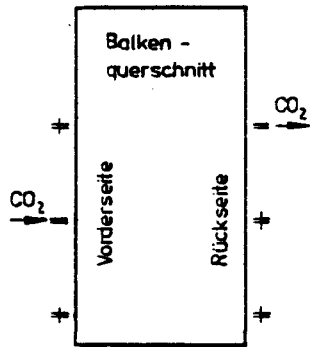


Rißbild - Verpreßvorderseite

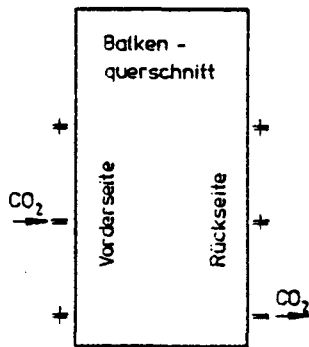


Rißbild - Verpreßrückseite (von der Verpreßvorderseite gesehen)

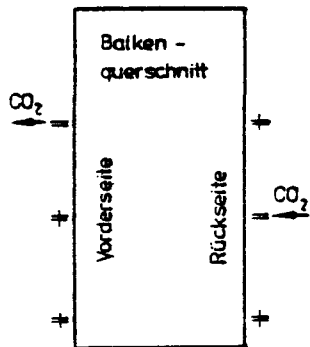
Bild 6 : Rißbild vor dem Verpressen, Balken 3



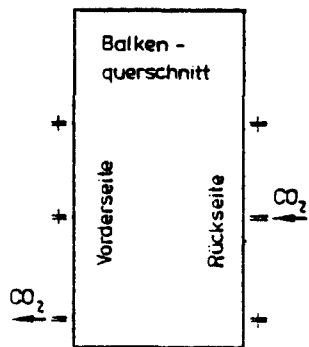
Richtung HO



Richtung HU



Richtung VO



Richtung VU

Bild 7 : Durchströmungsrichtungen des CO₂

Strömungs- richtung - s. Bild -	Riß 4	Riß 5	Riß 9	Riß 11
HO	4320	2370	1908	1920
HU	2046	1920	1908	2016
VO	1898	2004	1920	2142
VU	2111	1920	1974	1920
Σ	10 375	8214	7710	7798

Tabelle 3: Durchströmungsmengen CO₂ in Liter bei Balken 1

Strömungs- richtung - s. Bild -	Riß 4	Riß 6	Riß 11	Riß 13
HO	2075	2075	1850	1850
HU	2000	2000	2050	2050
VO	2000	2000	2000	2000
VU	2000	2000	1950	1900
Σ	8075	8075	7850	7700

Tabelle 4: Durchströmungsmengen CO₂ in Liter bei Balken 2

Strömungs- richtung - s. Bild -	Riß 4	Riß 6	Riß 10	Riß 12
HO	2000	2000	2000	2000
HU	2000	1500	1500	2000
VO	2000	2000	2000	2000
VU	2000	2000	2000	2000
Σ	8000	7500	7500	8000

Tabelle 5: Durchströmungsmengen CO₂ in Liter bei Balken 3

	Oberlast F _O - festgelegt -	Unterlast F _U - ermittelt -	Rißbreitenänderung Δw - gemessen -
Balken 1	137,5 kN	112,5 kN	0,049 mm
Balken 2	138,75 kN	107,5 kN	0,051 mm
Balken 3	137,5 kN	110 kN	0,050 mm

Tabelle 6: Lasten und Rißbreitenänderungen

2.4 Festlegung der Schwingbreiten für die Schwellbelastung

Nach der Begasung wurde die Schwingbreite für die Schwellbelastung wie folgt festgelegt:

An acht verschiedenen Rissen wurden Weggeber angebracht. Ausgehend von der bereits ermittelten Oberlast wurde jene Unterlast gesucht, zu der Rißbreitenänderungen im Mittel mit $\Delta w = 0,05$ mm gemessen wurden.

Die so ermittelten Lasten mit den dazugehörigen Rißbreitenänderungen sind aus Tabelle 6 zu ersehen. Die Frequenz der Schwellbeanspruchung betrug ca. 0,6 Hertz.

2.5 Verdämmen der Risse

Außer an den Rissen, die bereits für den Karbonatisierungsvorgang verdämmt waren, siehe Pkt. 2.3, wurden die Verdämmungsmaßnahmen unter halber Oberlast einen Tag vor dem Verpressen unter Schwelllast ausgeführt.

Zunächst wurden die Rißbereiche mit einer Drahtbürste gesäubert.

Im nächsten Arbeitsgang erfolgte das Setzen der Klebepacker, wie es unter Pkt. 2.5.1 beschrieben ist, die mit einem Zweikomponenten-Schnellkleber auf den Riß geklebt wurden. So erhielt jeder Riß 3 Packer; den unteren etwa 5 cm von der Balkenunterkante, den oberen knapp unterhalb der Rißwurzel und den mittleren mittig zwischen den beiden anderen Packern.

Alsdann erhielten die Rißbereiche einen Voranstrich mit einem Einkomponenten-Grundierer. Die eigentliche Verdämmung bestand aus einer zweikomponentigen Spachtelmasse auf kombinierter Polyurethan-Epoxidharz-Basis, die unter hinzufügen eines Stellmittels etwa 1 bis 2 mm dick aufgetragen wurde.

Die Anordnung der Einpreßöffnungen zeigen die Bilder 8 bis 10.

2.5.1 Einpreßöffnungen

Die Klebepacker bestehen aus einer Aluminiumscheibe von 48 mm Durchmesser und haben in ihrer Mitte einen Stutzen, in den entweder ein Kegelkopfnippel zum Schließen oder ein Verlängerungsrohr geschraubt werden kann.

Das Verlängerungsrohr aus Aluminium dient zum Aufstecken des Verpreßschlauches, der mit einer Schelle fest angezogen wird.

Der Schlauch aus Silikon-Kautschuk hat einen Außendurchmesser von 10 mm und einen Innendurchmesser von 6 mm.

3 Versuchsdurchführung

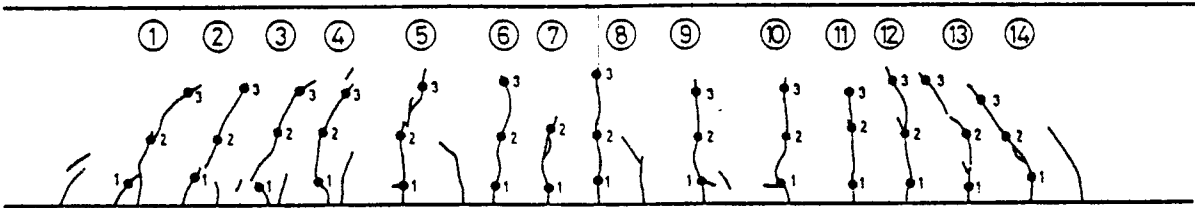
3.1 Versuchsplan

Der vorgesehene Versuchsplan

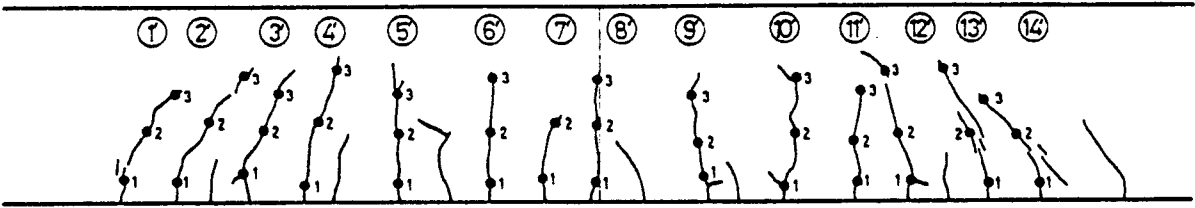
- 1. Tag Verpressen der Risse unter Schwellast
- 2. bis 4. Tag Erhärten des verpreßten Harzes unter Schwellast
- 5. Tag Verpressen der Risse unter statischer Last
- 6. bis 8. Tag Erhärten des verpreßten Harzes unter statischer Last
- 9. Tag Überlastungsversuch

wurde eingehalten.

Die zu verpressenden Risse mit ihren maximalen Rißbreiten sowie den beim Verpressen vorherrschenden Randbedingungen enthalten die Tabellen 7 bis 9.



Verpreß - bzw. Entlüftungsstellen - Verpreßvorderseite

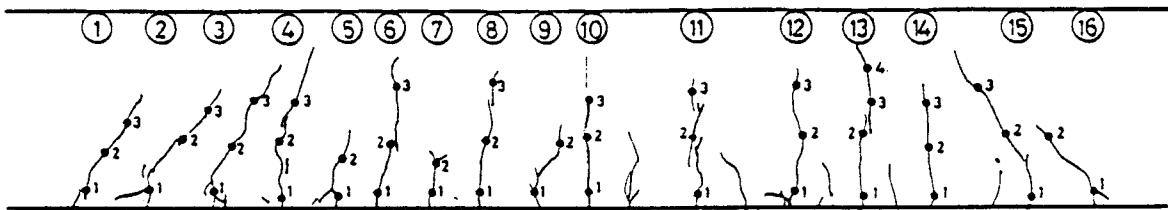


Verpreß - bzw. Entlüftungsstellen - Verpreßrückseite
(von der Verpreßvorderseite gesehen)

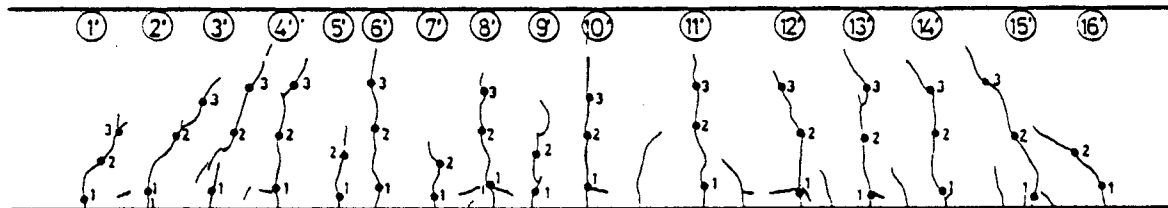
Bild 8 : Verpreß- bzw. Entlüftungsstellen, Balken 1

Vorderseite - warm -		Rückseite - kalt -		Beschaffenheit des Risses	Belastung des Balkens
Riß-		Riß-			
Nr.	breite max [mm]	Nr.	breite max [mm]	beim Verpressen	
1	0,24	1'	0,16	naß	statisch
2	0,24	2'	0,23	trocken	statisch
3	0,28	3'	0,26	naß	dynamisch
4	0,37	4'	0,42	karbonatisiert	dynamisch
5	0,45	5'	0,42	karbonatisiert	statisch
6	0,33	6'	0,36	trocken	dynamisch
7	0,32	7'	0,33	naß	statisch
8	0,42	8'	0,47	trocken, Fuge	dynamisch
9	0,45	9'	0,40	karbonatisiert	statisch
10	0,45	10'	0,47	trocken	dynamisch
11	0,33	11'	0,33	karbonatisiert	dynamisch
12	0,28	12'	0,31	naß	dynamisch
13	0,28	13'	0,31	trocken	statisch
14	0,24	14'	0,14	naß	statisch

Tabelle 7: Randbedingungen der Risse am Balken 1



Verpreß - bzw. Entlüftungsstellen - Verpreßvorderseite



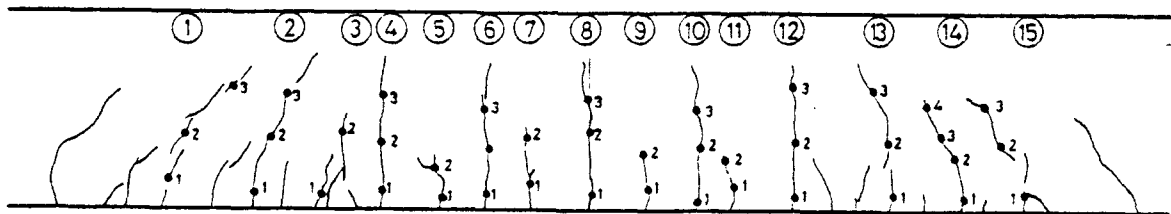
Verpreß - bzw. Entlüftungsstellen - Verpreßrückseite

(von der Verpreßvorderseite gesehen)

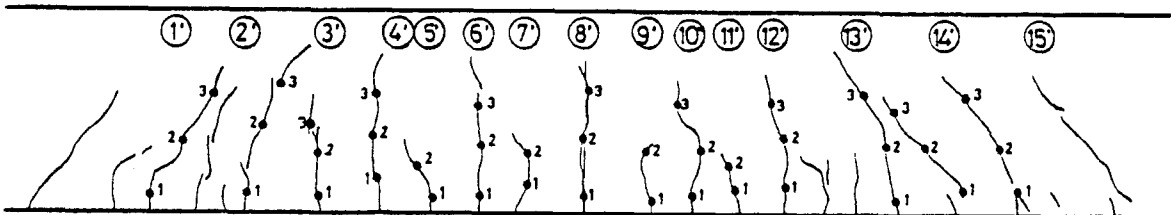
Bild 9 : Verpreß- bzw. Entlüftungsstellen, Balken 2

Vorderseite - warm -		Rückseite - kalt -		Beschaffenheit des Risses	Belastung des Balkens
Riß-		Riß-			
Nr.	breite max [mm]	Nr.	breite max [mm]	beim Verpressen	
1	0,26	1'	0,12	naß	statisch
2	0,24	2'	0,28	trocken	statisch
3	0,24	3'	0,26	naß	dynamisch
4	0,26	4'	0,30	karbonatisiert	dynamisch
5	0,24	5'	0,18	trocken	dynamisch
6	0,38	6'	0,34	karbonatisiert	statisch
7	0,24	7'	0,22	naß	dynamisch
8	0,44	8'	0,38	trocken	dynamisch
9	0,18	9'	0,12	naß	statisch
10	0,42	10'	0,38	trocken, Fuge	dynamisch
11	0,46	11'	0,50	karbonatisiert	statisch
12	0,36	12'	0,34	trocken	dynamisch
13	0,32	13'	0,34	karbonatisiert	dynamisch
14	0,28	14'	0,24	naß	dynamisch
15	0,30	15'	0,28	trocken	dynamisch
16	0,22	16'	0,18	naß	statisch

Tabelle 8: Randbedingungen der Risse am Balken 2



Verpreß - bzw. Entlüftungsstellen - Verpreßvorderseite



Verpreß - bzw. Entlüftungsstellen - Verpreßrückseite

(von der Verpreßvorderseite gesehen)

Bild 10 : Verpreß- bzw. Entlüftungsstellen, Balken 3

Vorderseite - warm -		Rückseite - kalt -		Beschaffenheit des Risses	Belastung des Balkens
Riß-		Riß-			
Nr.	breite max [mm]	Nr.	breite max [mm]	beim Verpressen	
1	0,26	1'	0,29	naß	statisch
2	0,41	2'	0,31	trocken	statisch
3	0,16	3'	0,29	naß	dynamisch
4	0,48	4'	0,40	karbonatisiert	dynamisch
5	0,16	5'	0,22	trocken	dynamisch
6	0,40	6'	0,43	karbonatisiert	statisch
7	0,23	7'	0,22	naß	dynamisch
8	0,48	8'	0,49	trocken, Fuge	dynamisch
9	0,20	9'	0,25	naß	statisch
10	0,57	10'	0,37	karbonatisiert	statisch
11	0,26	11'	0,28	trocken	dynamisch
12	0,43	12'	0,40	karbonatisiert	dynamisch
13	0,29	13'	0,30	naß	dynamisch
14	0,22	14'	0,29	trocken	statisch
15	0,26	15'	0,35	naß	statisch

Tabelle 9: Randbedingungen der Risse am Balken 3

3.2 Erwärmte Oberfläche

Die vordere Balkenseite wurde mit Heizstrahlern so angestrahlt, daß dort eine Bauwerkstemperatur von ca. + 35 °C herrschte, wie sie auch an den Stegen von Brückenträgern gemessen worden ist. Diese Seite wird im weiteren Text mit "warme Seite" bezeichnet. An der gegenüberliegenden, nicht angestrahnten Seite wurden Temperaturen von etwa + 25 °C gemessen. Diese Balkenseite wird im folgenden mit "kalte Seite" bezeichnet.

Die Bestrahlung begann am Morgen des Verpreßtages etwa 2 Stunden vor Beginn der Verpreßarbeiten und wurde abends nach Beendigung der Verpreßarbeiten 2 weitere Stunden aufrecht erhalten.

Die Strahler wurden im Abstand von 0,8 bis 1,0 m vom Versuchskörper plazierte. Die Heizintensität ließ sich in 3 Stufen regeln.

Die Abstände, die Strahlstufen sowie die Dauer der Aufheizung des Balkens wurden in Vorversuchen ermittelt, so daß die Oberflächentemperaturen annähernd konstant waren.

Die anhand der im Versuchskörper befindlichen Thermoelemente ermittelten Temperaturen wurden im Abstand von 30 Minuten ausgedruckt (Bilder 11 bis 13).

3.3 Verpreßgerät

Als Verpreßgerät fungierte eine Schlauchpumpe mit einem Getriebe von 62:1 (Bild 14).

Die Schlauchpumpe befördert ein vorgemischtes Harzsystem in einem Schlauch aus einem Behälter durch das Pumpengehäuse über die Verpreßöffnung in den Riß.

- (A) Verpreßbeginn
 (B) Verpreßende
- Bauteiltemperatur Vorderseite 'warm'
 □ Bauteiltemperatur Mitte
 ■ Bauteiltemperatur Rückseite 'kalt'
 △ Lufttemperatur Vorderseite
 ▲ Lufttemperatur Rückseite

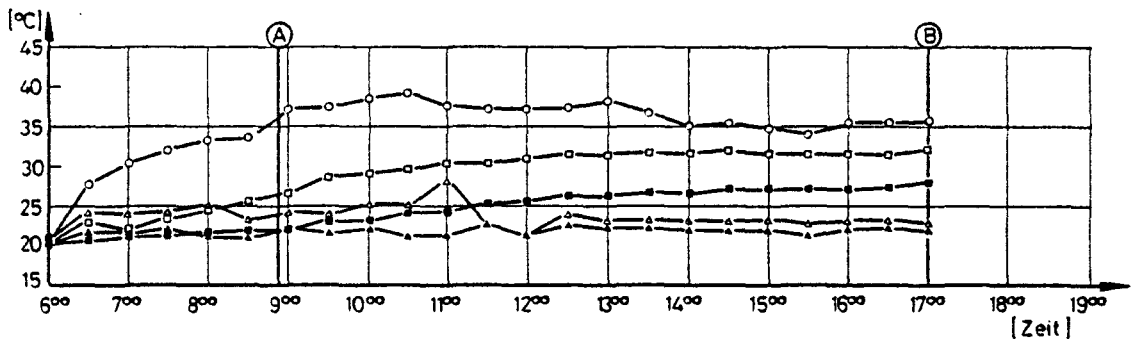
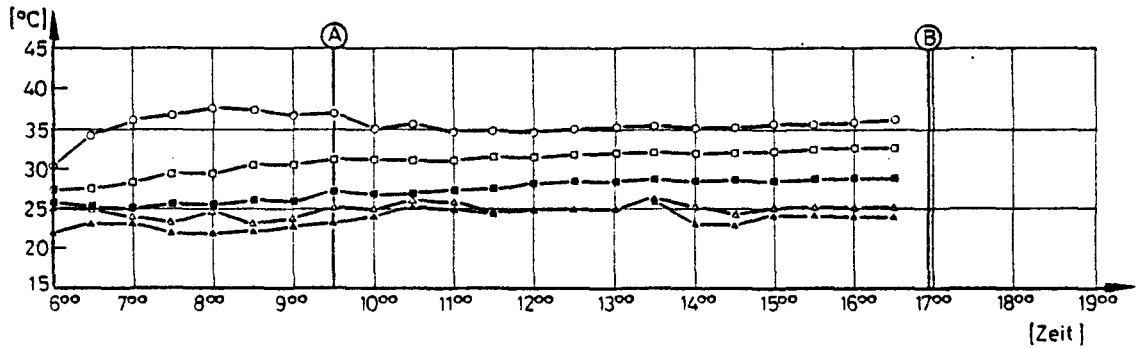
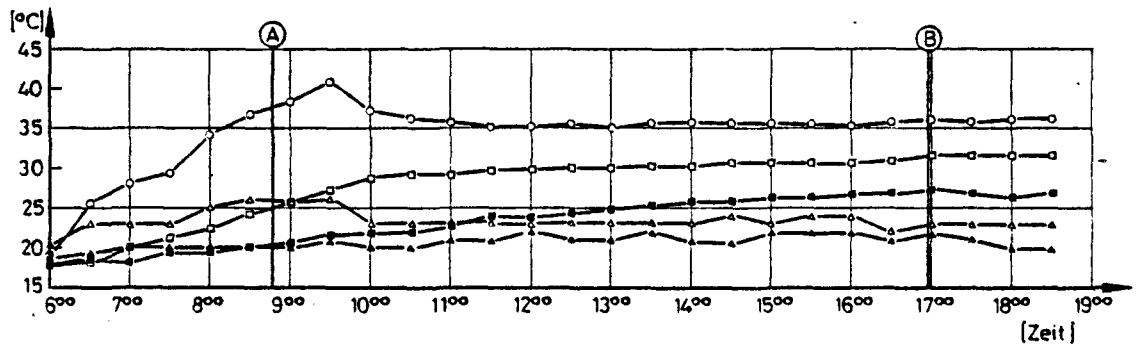


Bild 11 : Temperaturentwicklung, Balken 1

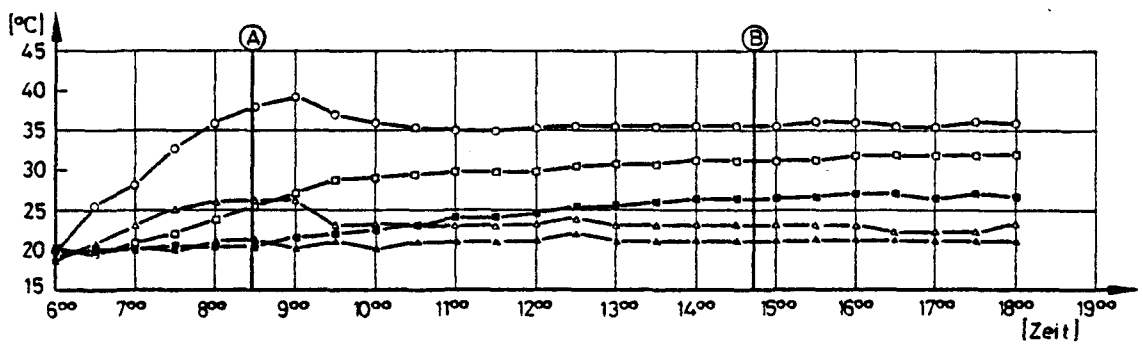
Ⓐ Verpreßbeginn

Ⓑ Verpreßende

- Bauteiltemperatur Vorderseite 'warm'
- Bauteiltemperatur Mitte
- Bauteiltemperatur Rückseite 'kalt'
- △ Lufttemperatur Vorderseite
- ▲ Lufttemperatur Rückseite



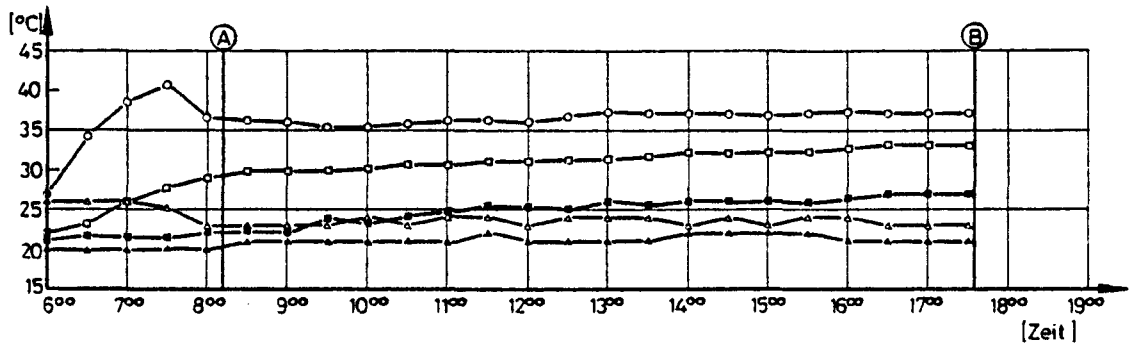
Verpressen unter Schwellast



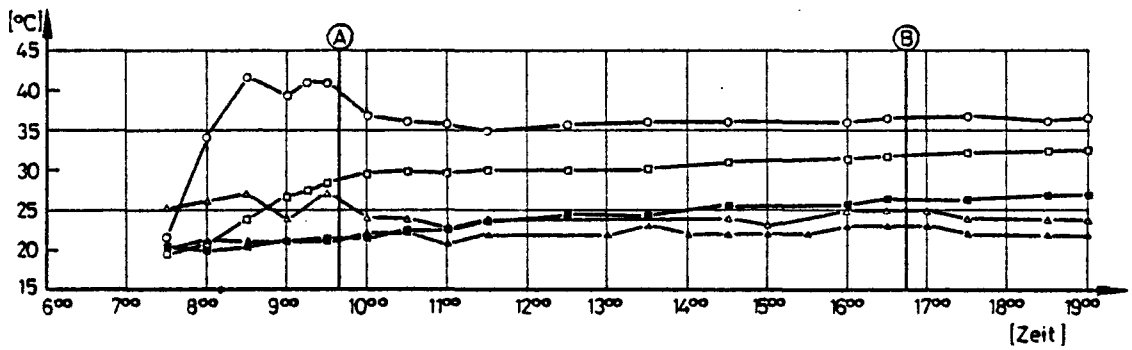
Verpressen unter statischer Last

Bild 12 : Temperaturentwicklung, Balken 2

- (A) Verpreßbeginn
 (B) Verpreßende
- | | | |
|---|-------------------|--------------------|
| ○ | Bauteiltemperatur | Vorderseite 'warm' |
| □ | Bauteiltemperatur | Mitte |
| ■ | Bauteiltemperatur | Rückseite 'kalt' |
| △ | Lufttemperatur | Vorderseite |
| ▲ | Lufttemperatur | Rückseite |



Verpressen unter Schwellast



Verpressen unter statischer Last

Bild 13 : Temperaturentwicklung, Balken 3

Der Harztransport erfolgt mittels einer rotierenden Welle, an deren Ende sich zwei Rollen befinden, die abwechselnd für jeweils eine halbe Wellenumdrehung den mit Harz gefüllten Schlauch gegen die Gehäusewandung drücken.

Das Harz kommt mit den beweglichen Teilen der Pumpe nicht in Berührung.

Da die Rollen verstellbar sind, können verschiedene Schlauchdicken verwendet werden.

Für die verwendete Schlauchpumpe ist ein maximaler Druck von 2 bar angegeben.

Die Überprüfung des Förderdruckes erfolgte dergestalt, daß an dem freien Schlauchende, das beim Verpressen auf dem Pakker fixiert ist, ein Manometer angebracht wurde, gegen das das Harz gepreßt wurde. Der veränderliche Rollenabstand zur Wandung des Pumpengehäuses deckte einen Druckbereich von etwa 1 bis 3 bar ab. Bei dem im Versuch vorhandenen Rollenabstand wurde ein Druck von 2 bar angezeigt.

Die beidseitige Drehrichtung der Welle ermöglichte sowohl ein Verpressen als auch ein Absaugen (z.B. Wasser aus dem Riß).

3.4 Verpreßmaterial

Die wichtigsten Eigenschaften der drei verwendeten Verpreßmaterialien sind in Tabelle 10 sowie in Tabelle 11 die der Systeme gegenübergestellt.

3.4.1 Harzformulierung 1

Beim ersten Versuchsbalken kam ein Epoxidharzsystem zur Anwendung, das aus einem reaktive Verdünner enthaltenden Epoxidharz auf Basis von Bisphenol A und einem aliphatischen Polyamin als Härterkomponente von geringer Reaktivität be-

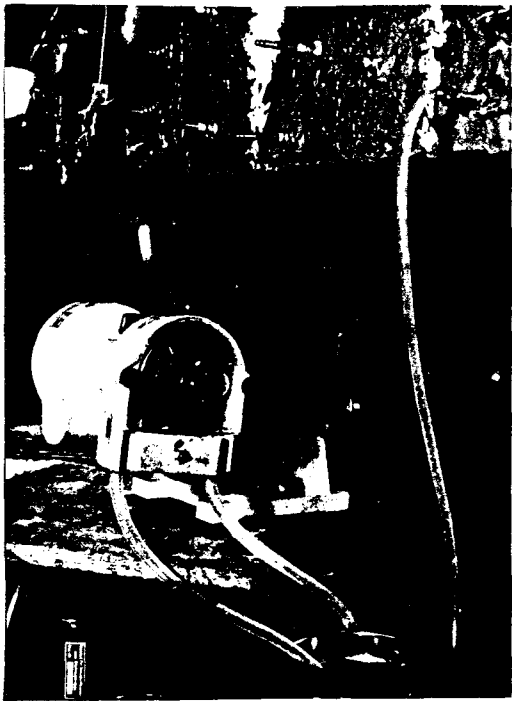


Bild 14 : Verpreßgerät

Einzelkomponenten	Viskosität [mPa·s]	Mischungsverhältnisse der Harzsysteme [Gew.-%]			Dichte [g/cm³]	Epoxidäqui- valentgewicht [g/Äquiv.]
		1	2	3		
Harz 1	280 - 360	100			1,09 - 1,19	154 - 161
Härter 1	5	28			0,86 - 0,87	-
Harz 2	750 - 850		100		1,12 - 1,16	175 - 185
Härter 1	5		25		0,86 - 0,87	-
Harz 2	750 - 850			100	1,12 - 1,16	175 - 185
Härter 2	15 - 20			31	0,91 - 0,95	-

Tabelle 10: Eigenschaften der Einzelkomponenten und Mischungsverhältnisse
(nach Angabe des Herstellers)

	Temperatur	Harzsystem 1	Harzsystem 2	Harzsystem 3
Viskosität [mPa · s]	23 °C	100	250	400
	35 °C	50	100	180
Verarbeitungszeit [min.]	23 °C	50	40	15
	35 °C	9	5	*)
Zugfestigkeit [N/mm²]	23 °C	60 - 65		

*) Reaktivität für praktikable Verarbeitung zu hoch

Tabelle 11: Eigenschaften der verwendeten Harzsysteme
(nach Angabe des Herstellers)

stand. Diese Formulierung wurde schon im Rahmen der Grundsatzprüfungen des BMV untersucht und fiel durch ein besonders ausgewogenes Eigenschaftsspektrum auf.

Es wurde grundsätzlich bei allen Formulierungen das vom Hersteller angegebene Mischungsverhältnis angewendet. Da die Komponenten in 1 kg- bzw. 0,5 kg- Dosen angeliefert wurden, mußten die einzelnen Mischungen abgewogen werden.

3.4.2 Harzformulierung 2

Für den zweiten Versuchsbalken wurde ebenfalls ein reaktive Verdünner enthaltendes Epoxidharz auf Basis von Bisphenol A und ein aliphatisches Polyamin von geringer Reaktivität (identisch mit dem der Formulierung 1) ausgewählt. Mit diesem Harz ergibt sich laut Hersteller ein System mit besserer Haftung auf feuchtem Beton. Die Formulierung 2 besitzt weiterhin gegenüber Formulierung 1 eine höhere Viskosität und eine etwas kürzere Verarbeitungszeit.

3.4.3 Harzformulierung 3

Der dritte Versuchsbalken wurde mit einer Formulierung verpreßt, die aus der gleichen Harzkomponente wie bei der Formulierung 2 und einem hochreaktiven, modifizierten, aliphatischen Polyamin bestand. Dieses System besitzt eine noch höhere Viskosität und eine wesentlich kürzere Verarbeitungszeit. Außerdem ist es für sehr feuchte Betonoberflächen ausgelegt.

Während durch die größere Viskosität für das Verpressen keine Schwierigkeiten befürchtet werden mußten, bereitete die kurze Verarbeitungszeit von ca. 15 Minuten bei + 23 °C doch einige Probleme, da immerhin Bauteiltemperaturen von etwa + 35 °C vorlagen.

Vorversuche zeigten, daß auch das Herstellen kleinerer Mischungen nur unwesentliche Vorteile brachte. Deshalb wurden beide Komponenten auf eine Temperatur von + 15 °C herunter-

gekühlt und nach dem Mischen als verpreßfertige Formulierung in ein Wasserbad von + 13 °C gesetzt, wodurch die Verarbeitungszeit erheblich verlängert wurde (Tabelle 22).

3.5 Behandlung der Feuchtrisse

Am Verpreßtag wurden morgens vor Beginn der Verpreßarbeiten zur Erzielung nasser Rißflanken alle dafür vorgesehenen Risse (Tabellen 7 bis 9) mit Wasser verpreßt. Dieses Verpressen erfolgte vom untersten Punkt der "kalten Seite" aus. Nach Wasseraustritt an den übrigen Verpreßöffnungen wurden diese durch Verpreßnippel geschlossen.

Zwischen dieser Verpressung und der Epoxidharz-Verpressung bestand ein Zeitraum von mehreren Stunden. Zum Ausgleich für vom Betongefüge während dieser Zeit aufgesaugtes Wasser wurde unmittelbar vor der Epoxidharzverpressung nochmals der Riß mit Wasser verpreßt, das dann aber sofort wieder abgesaugt wurde.

Zwischen dem Absaugen des Wassers und dem Beginn der Epoxidharzverpressung bestand ein Zeitraum von nur 2 bis 3 Minuten, der es rechtfertigte, von nassen Rißflanken auszugehen.

Bei den Rissen 7 (Balken 1 bis 3) und 9 (Balken 2 und 3) wurde das Wasser nicht abgesaugt, so daß gegen die wasserführenden Risse verpreßt wurde und das Wasser mit dem Harz aus den Entlüftungsstellen austrat.

3.6 Durchführung der Epoxidharzverpressung

Zur Mischung der beiden Komponenten des Epoxidharzes, siehe Pkt. 3.4, wurde die Härterkomponente in die Harzkomponente gegeben und so lange manuell umgerührt, bis sämtliche Schlieren im Mischgut verrührt waren. Dieser Vorgang dauerte im allgemeinen zwei bis drei Minuten.

Sodann wurde der durch die Pumpe laufende Verpreßschlauch, siehe Pkt. 3.3, mit einem Ende in den Behälter mit dem Mischgut gehalten und die Pumpe per Schalthebel in Bewegung gesetzt, wodurch das Harz angesaugt wurde.

Damit vermieden wurde, daß zunächst Luft in den Riß gepreßt wurde, erfolgte die Befestigung des Verpreßschlauches am Packer erst dann, nachdem das angesaugte Harz das freie Ende des Schlauches erreicht hatte.

In diesem Zustand wurde der Schlauch auf das in den Packer eingeschraubte Röhrchen gesteckt und mit einer Schelle festgeschraubt.

Das Verpressen von Balken 1 begann am untersten Punkt der "kalten Seite", wobei auf beiden Balkenseiten die Packer geöffnet waren. Der erste Harzaustritt erfolgte etwa gleichzeitig am mittleren Packer der Verpreßseite und am unteren Packer der gegenüberliegenden Balkenseite. Nach Schließung der beiden unteren Verpreßöffnungen der "kalten Seite" wurde das Verpressen vom untersten Punkt der "warmen Seite" fortgesetzt. Die zur Verfügung stehende Verarbeitungszeit erlaubte es, die Verpreßöffnungen von unten nach oben bei jeweiligem Wechsel der Balkenseite zu verpressen.

Da beim Verpressen von Balken 1 das Verpressen aller Verpreßöffnungen doch zeitraubend war, wurde bei Balken 2 versucht, von einer Verpreßöffnung aus den gesamten Riß zu verpressen, was auch gelang. Dies war auch im Hinblick auf die bevorstehenden Verpreßarbeiten an Balken 3 erforderlich, wo nur eine äußerst knappe Verarbeitungszeit zur Verfügung stehen würde. Demzufolge wurden die Verpreßarbeiten vom untersten Punkt der erwärmten Balkenseite vorgenommen.

Der Balken 3 stellte den am schwierigsten zu verpressenden Versuchskörper dar, weil hier das Harzsystem mit der kürzesten Verarbeitungszeit zur Anwendung kam. Deshalb wurde der Balken nur von der unteren Öffnung der kalten Seite verpreßt. Zusätzlich wurde das heruntergekühlte Material (siehe

he Pkt. 3.4.3) während des Verpressens in dem Leitungswasserbehälter aufbewahrt, um die Reaktionszeit zu verlängern. Sicherheitshalber wurde die Temperatur des Mischgutes laufend überwacht, um das Verpressen notfalls sofort abzubrechen.

Bei etwa zwei Dritteln aller Risse gab es Undichtigkeiten in der Verdämmung, die durch Auftragen des in Pkt. 2.5 erwähnten Schnellklebers, der in abgewogenen Mengen bereit stand, behoben werden konnten.

Zum Ausgleich für durch Kapillarwirkung dem Riß entzogenes Harz wurde entweder eine Nachverpressung vorgenommen oder auf den in die Packer geschraubten Röhrchen kurze Enden der transparenten Verpreßschläuche befestigt, am Balken hochgebunden und in diese eine Harzreserve bis über das Niveau der Rißwurzel gepumpt, was ein Nachverpressen weitgehend entbehrlich machte.

3.7 Überlastungsversuch

Nach der dreitägigen Erhärtung des unter statischer Last verpreßten Harzes wurde ein Überlastungsversuch durchgeführt. Ausgehend von der statischen Oberlast wurde die Last stufenweise mit einer Schrittweite von 10 kN/Presse erhöht und das Verhalten der verpreßten Risse beobachtet.

Die Beobachtung erfolgte mit einer Lupe und erwies sich insofern als schwierig, als daß die mechanisch entfernte Verdämmung eine verhältnismäßig raue Oberfläche hinterließ.

Die wichtigsten Beobachtungen sind in den Tabellen 12 bis 14 wiedergegeben.

Alle dabei neu entstandenen Risse wurden aufgezeichnet und sind in den Bildern 15 bis 17 dargestellt, die auch die Bohrkernentnahmestellen beinhalten.

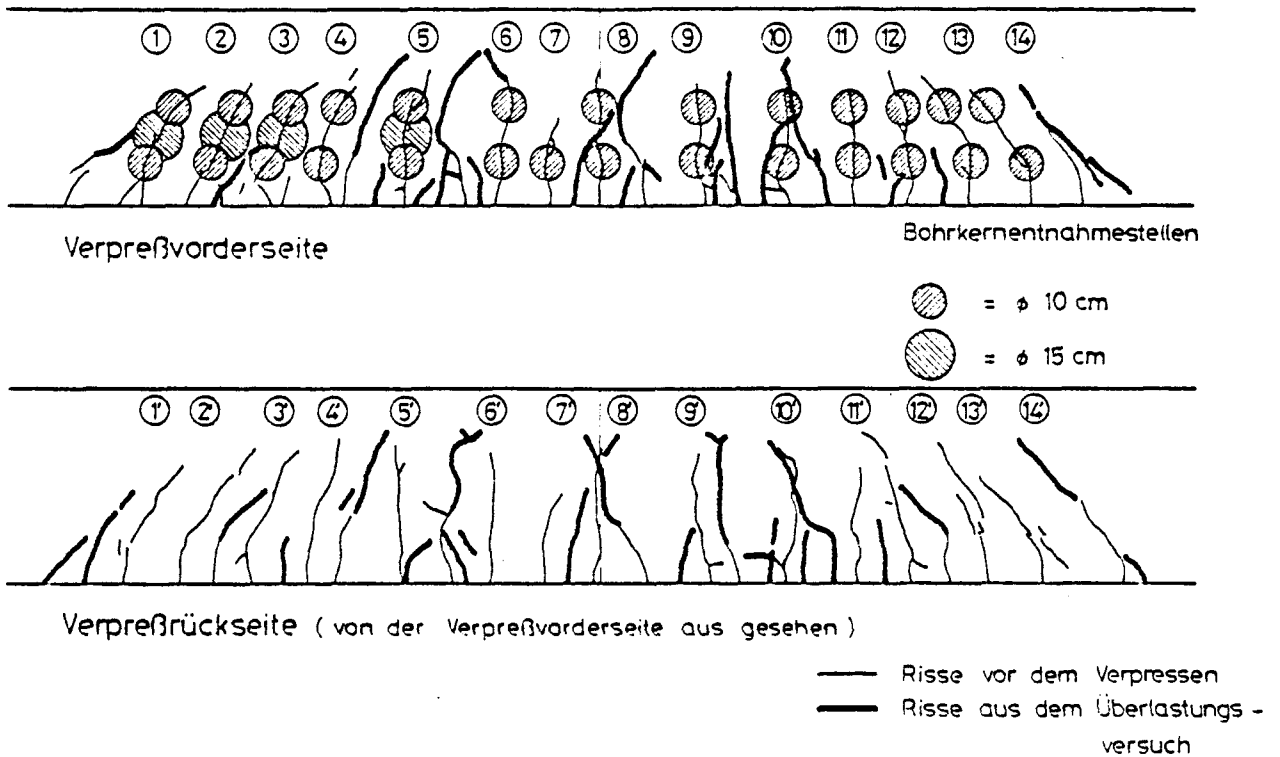


Bild 15 : Balken 1 nach dem Überlastungsversuch

Last/Presse [kN]	Beobachtungen
137,5	augenscheinlich alle Risse voll verpreßt
150	"
160	2 neue Risse : zwischen Riß 10 und 11 sowie zwischen Riß 12 und 13
170	neuer Riß zwischen Riß 10' und 11'
180	Verlängerung der unverpreßten Risse
190	neuer Riß neben Riß 8' (Fuge)
200	neue Risse zwischen Riß 11 und 12 sowie zwischen Riß 11' und 12
205	weitere neue Risse ein Aufgehen der verpreßten Risse wurde nicht beobachtet, Abbruch des Überlastungsversuchs

Tabelle 12: Überlastungsversuch Balken 1

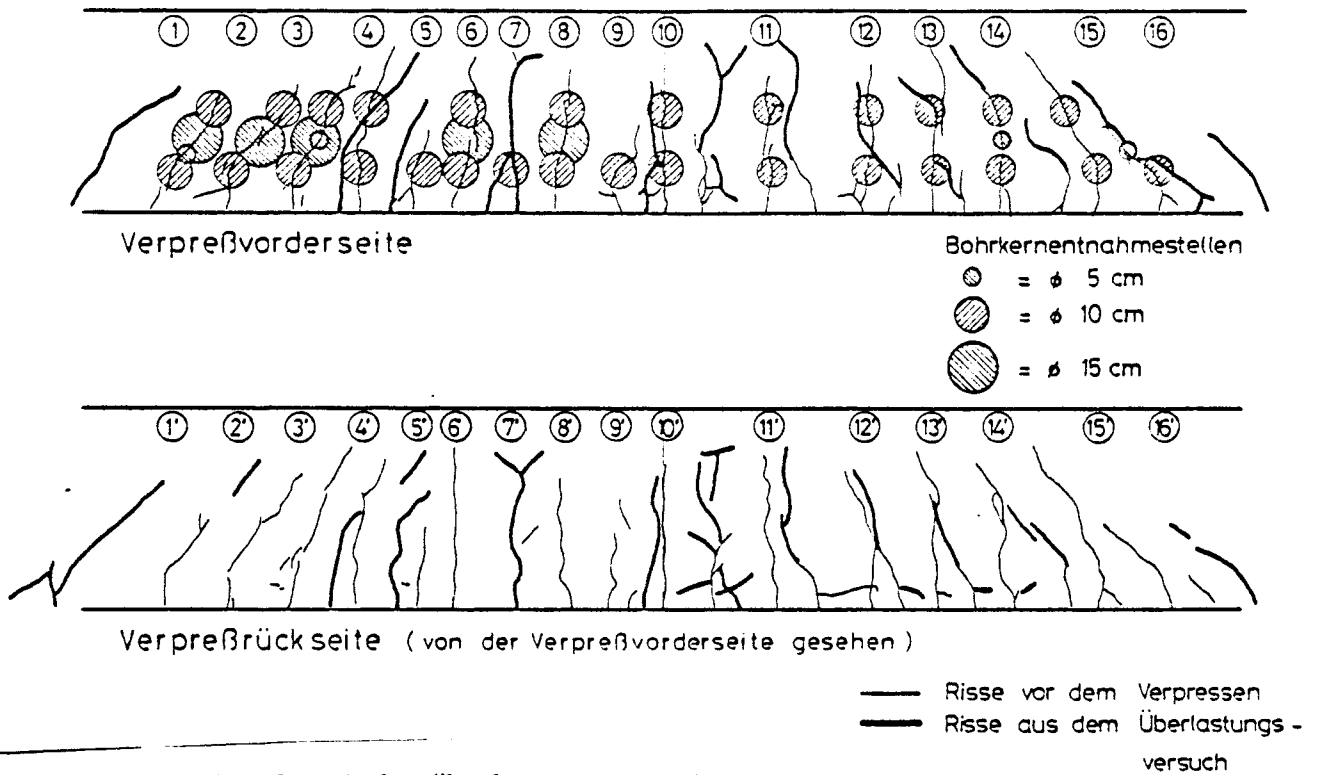


Bild 16 : Balken 2 nach dem Überlastungsversuch

Last/Presse [kN]	Beobachtungen
138,75	augenscheinlich alle Risse voll verpreßt
150	"
160	"
170	"
180	neuer Riß neben Riß 12, neben Riß 7' und zwischen Riß 3 und 4, Riß 7 scheint aufgegangen zu sein
190	neuer Riß zwischen Riß 3' und 4'
200	neuer Riß zwischen Riß 9 und 10 und zwischen Riß 9' und 10'
207,5	Ein Aufgehen der verpreßten Risse wurde außer Riß 7' nicht beobachtet Abbruch des Überlastungsversuchs

Tabelle 13: Überlastungsversuch Balken 2

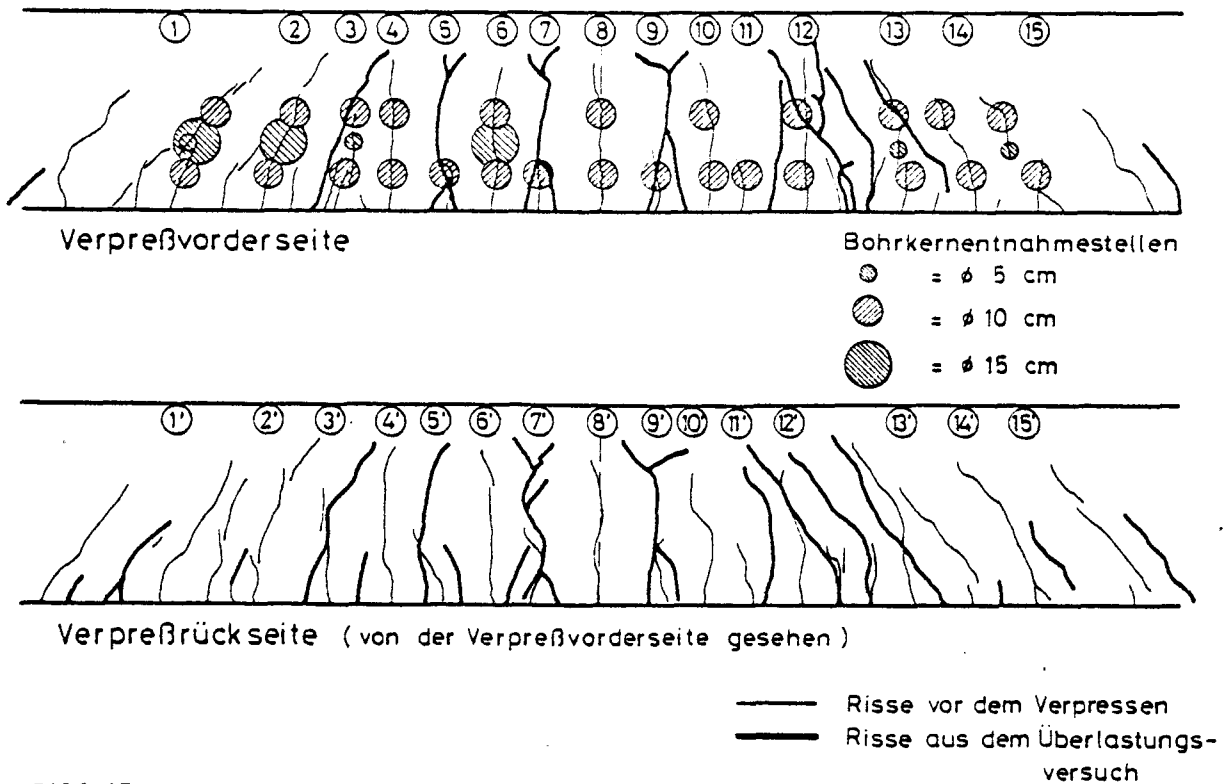


Bild 17 : Balken 3 nach dem Überlastungsversuch

Last/Presse [kN]	Beobachtungen
137,5	alle Risse augenscheinlich gut verpreßt
150	Verlängerung des unverpreßten Risses zwischen Riß 12' und 13'
160	wie vor zwischen Riß 12 und 13 neuer Riß zwischen Riß 3' und 4'
180	neue Risse: neben Riß 3, neben Riß 5, neben Riß 7', zwischen Riß 8' und 9'
190	neuer Riß links und rechts vom Riß 7 neuer Riß zwischen Riß 13' und 14' Riß 9' scheint aufzugehen
200	neuer Riß zwischen Riß 6 und 7 neuer Riß zwischen Riß 5' und 6'
212,5	Ein Aufgehen der verpreßten Risse wurde außer Riß 9' nicht beobachtet Abbruch des Überlastungsversuchs

Tabelle 14: Überlastungsversuch Balken 3

Der Überlastungsversuch wurde erst kurz bevor die tatsächliche Bruchlast fast erreicht war beendet. Dies erwies sich im Hinblick auf eine möglichst hohe Beanspruchung des gesamten Bauteils als unbedingt erforderlich, wenn auch die Probenentnahme dadurch erschwert wurde.

4 Probenherstellung

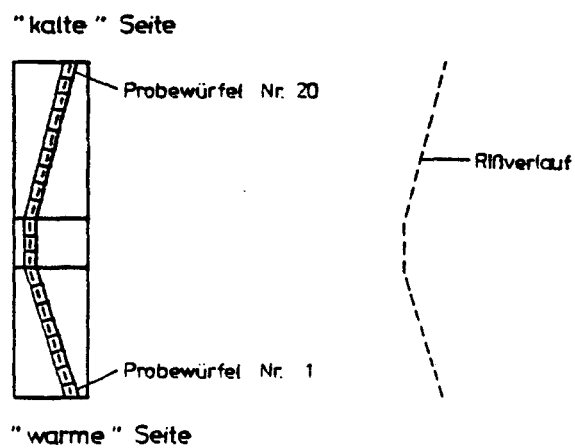
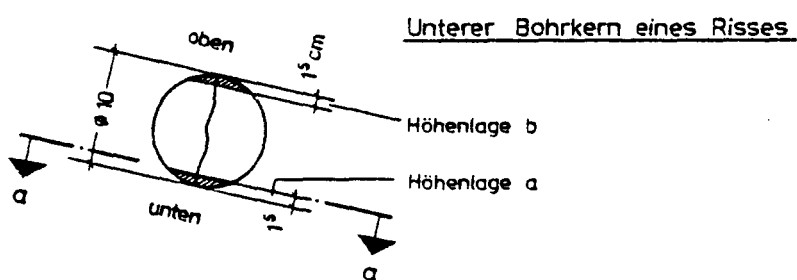
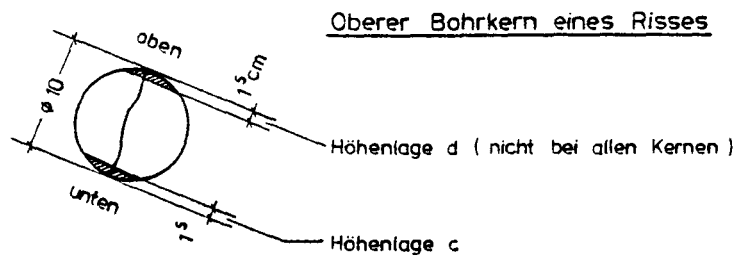
4.1 Herstellung der Proben für die Rasterelektronenmikroskopie

Die Untersuchung der verpreßten Risse erfolgte an Probestücken, die mehrheitlich eine Würfelform mit einer Kantenlänge von etwa 13 mm hatten, und die wie folgt aus den Balken herausgeschnitten wurden:

Zunächst wurden nach dem Überlastungsversuch aus dem Balken in zwei Höhenlagen Bohrkerne vom Durchmesser 10 cm gezogen (Bild 18).

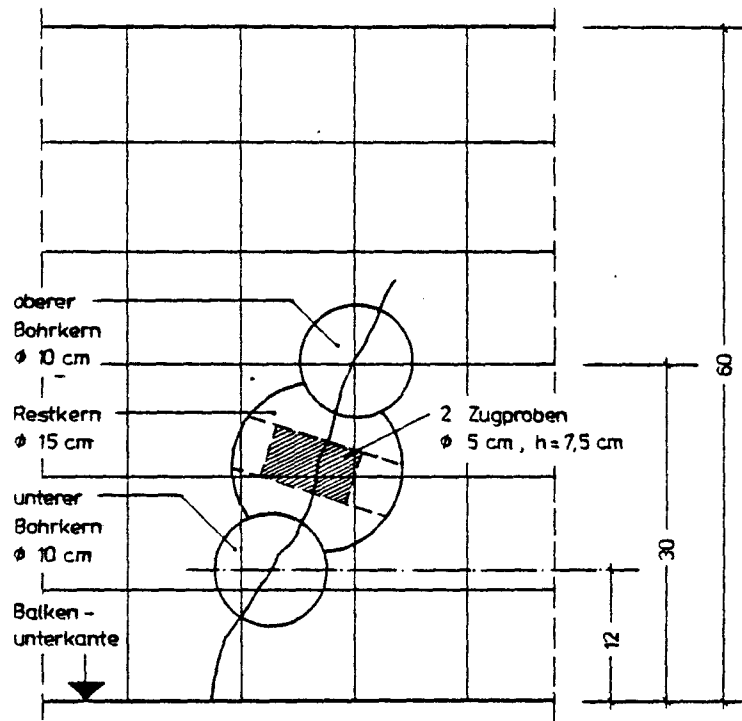
Von diesem Kern wurde entsprechend des Rißverlaufs oben und unten ein Segment abgesägt, so daß im allgemeinen vier verschiedene Höhenlagen entstanden. Dieses Segment wurde in die Proben zersägt.

Die Zerlegung eines Bohrkernes zeigt Bild 19. Mit Hilfe materialspezifisch abgewandelter kombinierter Schleif- und Poliertechniken wurde schließlich an dem zu betrachtenden Querschnitt eine abbildungsfähige Schliffflächenqualität erzeugt. Die einzelnen Arbeitsschritte waren so abzustimmen, daß das Entstehen von Artefakten oder gar Verbundverlusten vermieden wurde. Die weitere Probenpräparation bestand aus einer Besputterung mit einer dünnen Goldschicht, die sich aus mehreren Monolagen zusammensetzt.



Schnitt a-a Draufsicht auf das Segment

Bild 18 : Zerlegung eines Bohrkerns in Probewürfel



Seitenansicht des Balkens

Bild 19 : Anordnung der Bohrkerne für die Zugprüfungen
am Beispiel Balken 1 - Riß 2

4.2 Zusätzliche Proben

4.2.1 Proben ohne Überlastung

Um Gewißheit darüber zu erhalten, ob Störungen des Verbundes zwischen Epoxidharz und Beton, die bei nassen Rissen festgestellt wurden, aus dem Überlastungsversuch resultierten, wurde bei den Balken 2 und 3 je ein Bohrkern (\varnothing 5 cm) der entsprechenden Risse gezogen.

Die Entnahme erfolgte jeweils am Ende der jeweiligen Erhärtungsphase. Die Entnahmestellen sind in den Bildern 16 und 17 festgehalten.

4.2.2 Zugproben

Da beim Überlastungsversuch auf Biegung nicht unbedingt die gleiche Beanspruchung für alle Risse eintreten konnte, wurden aus den Restbereichen zwischen der oberen und unteren Bohrkernreihe weitere Kerne mit einem Durchmesser von 15 cm entnommen, aus denen dann die Zugproben herausgebohrt wurden (\varnothing 5 cm; $l = 7,5$ cm).

Diese 15-cm-Bohrkerne sind ebenfalls in den Bildern 15 bis 18 enthalten.

Die Proben wurden so in der Zugprüfmaschine geprüft, daß die verpreßte Reißebene etwa senkrecht zur Kraft verlief. Natürlich muß berücksichtigt werden, daß Risse naturgemäß einen unregelmäßigen Verlauf nehmen. Einige Proben konnten zudem nicht untersucht werden, bei denen durch Risse aus dem Überlastungsversuch oder durch die Bohrkernentnahme gem. Pkt. 4.2.1 das Betongefüge zerstört war. Diese Verhältnisse müssen bei Betrachtung der Tabellen 15 bis 17, die die Ergebnisse der Zugprüfung enthalten, berücksichtigt werden.

Nach den Zugversuchen wurden die Zugkörper so zersägt, daß Proben nach 4.1 entstanden.

Riß-Nr.	Kern-Nr. *	Lage	σ_z [N/mm²]	Bruchfläche
1 (naß, stat.Last)	11	warme Seite	2,79	im Beton
	12	kalte Seite	2,74	
2 (trocken, stat.Last)	21	warme Seite	1,44	
	22	kalte Seite	2,18	
3 (naß, Schwell- last)	31	warme Seite	0,20	im verpreß- ten Riß
	32	kalte Seite	0,20	
5 (karbon., stat.Last)	51	warme Seite	1,85	im Beton
	52	kalte Seite	2,21	

Tabelle 15: Zugversuche
an Proben des Balkens 1

* Die Kerne lagen mit dem Mittelpunkt 7,5 cm
von der Außenfläche entfernt

Riß-Nr.	Kern-Nr.	Lage	σ_z [N/mm²]	Bruchfläche
1 (naß, stat.Last)	11	warme Seite	1,27	im verpr.Riß
	12	kalte Seite	0,39	im Beton
2 (trocken, stat.Last)	21	warme Seite	1,24	im Beton
	22	kalte Seite	2,37	
3 (naß, Schwell- last)	31	warme Seite	0,45	im verpreßten Riß
	32	kalte Seite	0,24	
6 (Karbon., stat.Last)	61	warme Seite	1,10	im Beton
	62	kalte Seite	2,65	
8 (trocken, Schwell- last)	81	warme Seite	0,48	im Beton
	82	kalte Seite	0,48	

Tabelle 16: Zugversuche
an Proben des Balkens 2

Riß-Nr.	Kern-Nr.	Lage	σ_z [N/mm²]	Bruchfläche
1 (naß, stat.Last)	11	warme Seite	0,33	im verpr.Riß
	12	kalte Seite	nicht prüfbar	
2 (trocken, stat.Last)	21	warme Seite	nicht prüfbar	
	22	kalte Seite	1,82	im Beton
6 (Karbon., stat.Last)	61	warme Seite	2,04	im Beton
	62	kalte Seite	2,31	

Tabelle 17: Zugversuche
an Proben des Balkens 3

5 Ergebnisse

5.1 Äußerer Zustand der Proben

Soweit optisch festgestellt werden konnte, waren die Risse gut verfüllt.

Mängel in Form von Abblätterungen des verpreßten Harzes vom Beton waren lediglich bei nassen und gegen stehendes Wasser verpreßten Rissen zu erkennen.

5.2 Zugversuche

Sämtliche Naßrisse, die unter Schwellast verpreßt waren, brachen beim Zugversuch im verpreßten Riß, siehe auch Tabellen 15 bis 17, während bei den Trockenrissen ein Betonbruch erfolgte.

5.3 Rißbreitenmessungen während des Verpressens bei Balken 3

Am Balken 3 wurden an den Rissen 2, 3, 7, 8 (Mittelfuge), 11 und 13 die Rißbreitenänderungen während des Verpressens unter Schwellast und während der Erhärtungsphase gemessen, um hieraus Rückschlüsse auf den Erhärtungsverlauf des Harzes zu ziehen.

Die Messungen erfolgten durch induktive Weggeber an den breitesten Stellen der Risse; die Aufzeichnung geschah mit einem x-y-Schreiber.

In der Reihenfolge ihres Verpressens wurde folgendes Verhalten festgestellt.

Die Rißbreitenänderung Δw des Risses 8 (Mittelfuge) betrug vor Verpreßbeginn etwa 0,055 mm, siehe Bild 20.

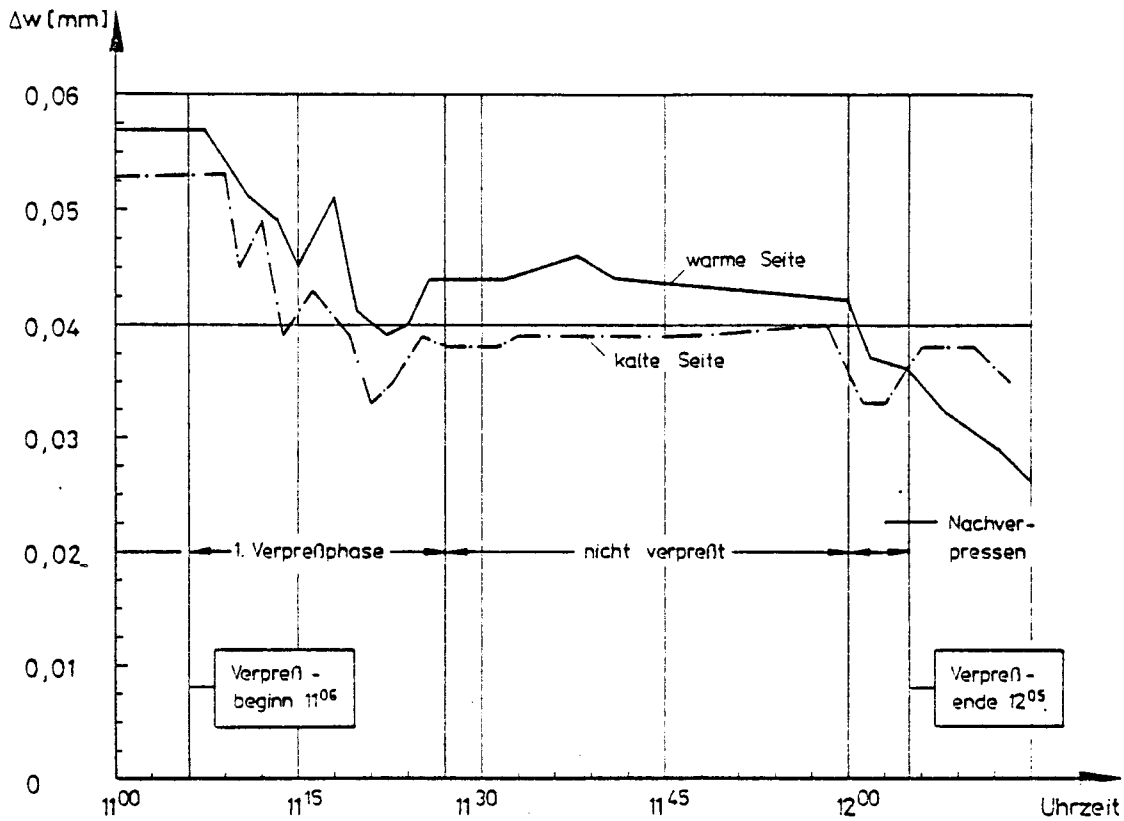


Bild 20 : Entwicklung der Rißbreitenänderungen
Riß 8 - Verpressen unter Schwelllast

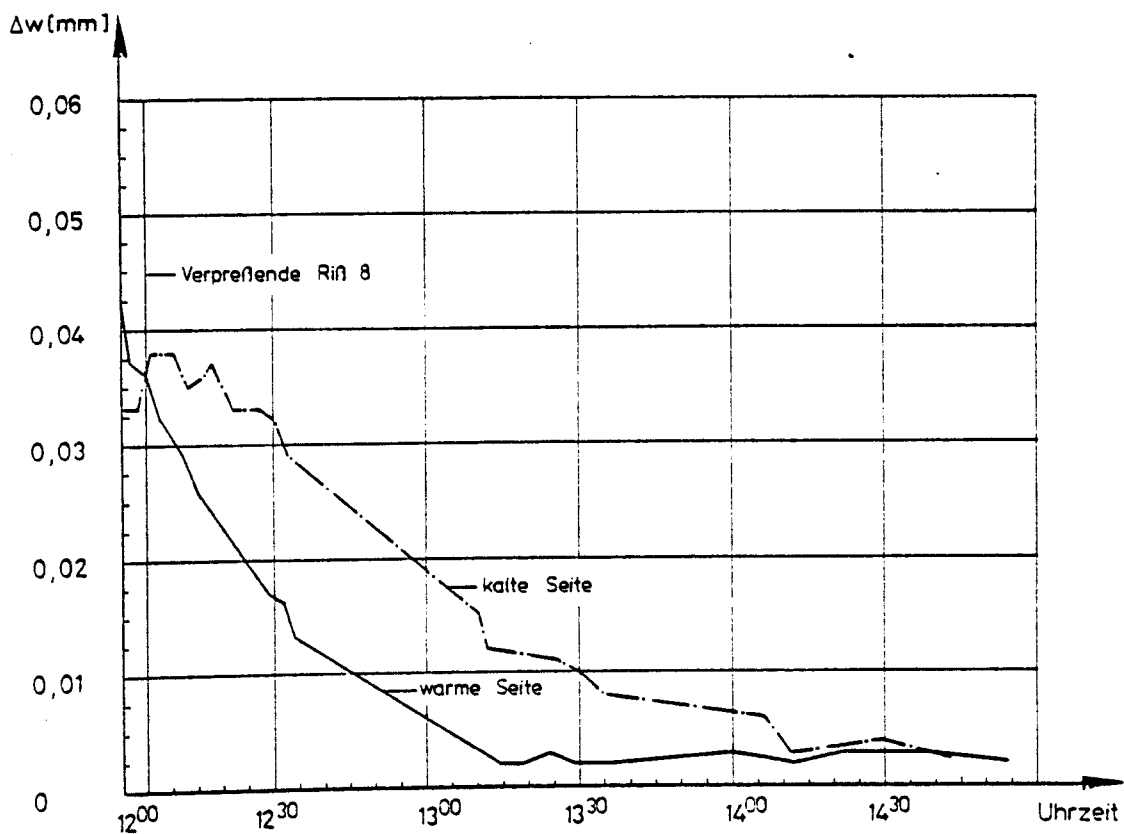


Bild 21 : Entwicklung der Rißbreitenänderungen
Riß 8 - Erhärtungsphase unter Schwelllast

Die erste Verpreßphase betrug 21 Minuten. Bereits während dieser Zeit sank die Rißbreitenänderung auf etwa 0,041 mm herab.

Einer 33-minütigen Verpreßpause schloß sich ein 5-minütiges Nachverpressen an. Am Ende dieses Nachverpressens wurde ein Δw von 0,037 mm gemessen.

Bild 20 zeigt außerdem das unstetige Verhalten des Risses während des Verpreßvorganges. Diese Effekte resultieren vermutlich aus dem ungleichmäßigen Verpressen; d.h. die Pumpe wird nur in Bewegung gesetzt, wenn der Riß das Harz annimmt.

Das Verhalten des Risses während der Erhärtungsphase ist aus Bild 21 zu ersehen. Schon 3 Stunden nach Verpreßende war die Auswirkung der Schwellast so gering, daß von einem Zustand-I-ähnlichen Verhalten gesprochen werden kann. Bei einer Meßbasis von 2 cm und einem gemessenen Δw von 0,0025 mm ergibt sich eine Betonzugdehnung von 0,125 mm/m.

Das Δw von RiB 3 betrug ca. 0,01 mm und wurde durch das Verpressen ebenfalls auf 0,0025 mm gedrückt.

RiB 11 hatte ein Ausgangs- Δw von etwa 0,036 mm. Ein Nachverpressen war hier nicht möglich, da die Erhärtungsphase sofort nach Beendigung des Verpressens einsetzte, siehe Bild 22. Der Zustand I war nach etwa 2 1/2 Stunden erreicht.

RiB 13 war ein Naßriß mit einem ähnlichen Verhalten wie RiB 11. Sein Ausgangs- Δw betrug ebenfalls 0,036 mm und etwa 3 Stunden nach Verpreßende war der Zustand-I-ähnliche Zustand erreicht. Allerdings begann hier die Erhärtungsphase schon unmittelbar nach Verpreßbeginn, siehe Bild 23.

RiB 7, ein mit Wasser gefüllter Riß, wurde als letzter Riß unter Schwellast verpreßt, als die vorher verpreßten Risse zu einem wesentlichen Teil ausgehärtet waren. Damit stieg

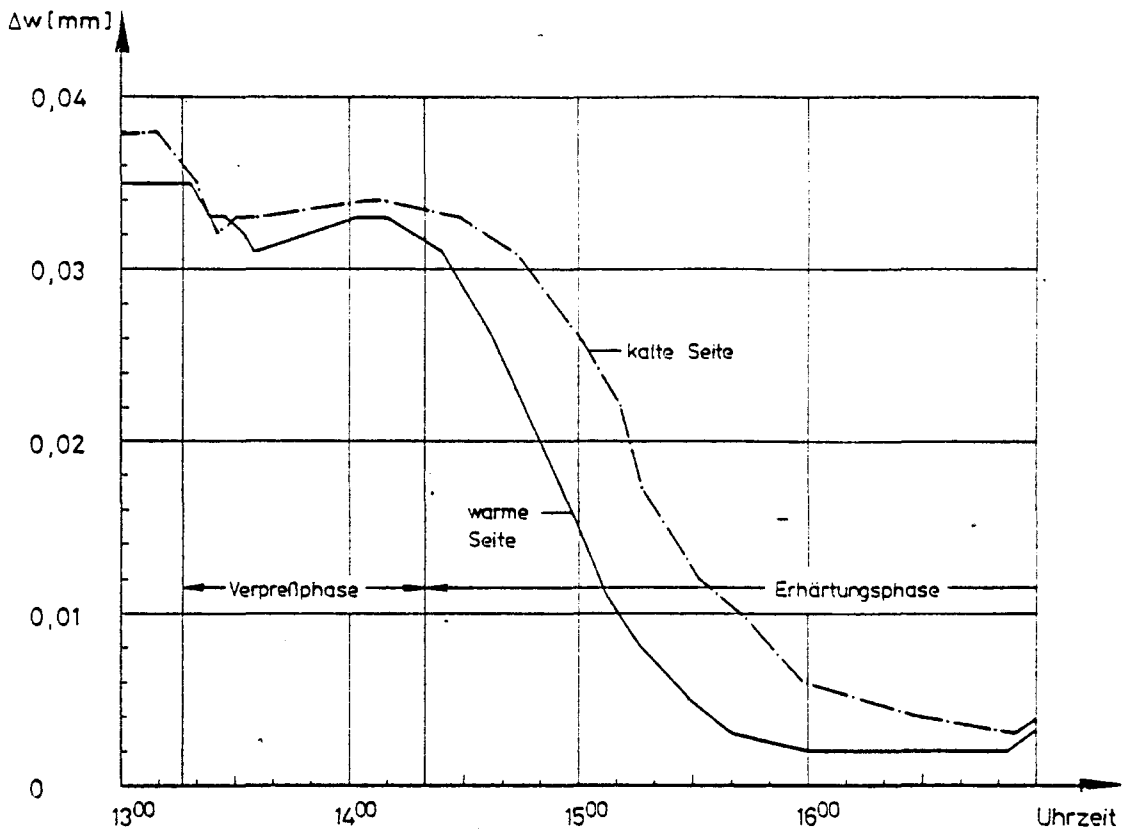


Bild 22 : Entwicklung der Rißbreitenänderungen
Riß 11 - Verpressen unter Schwellast

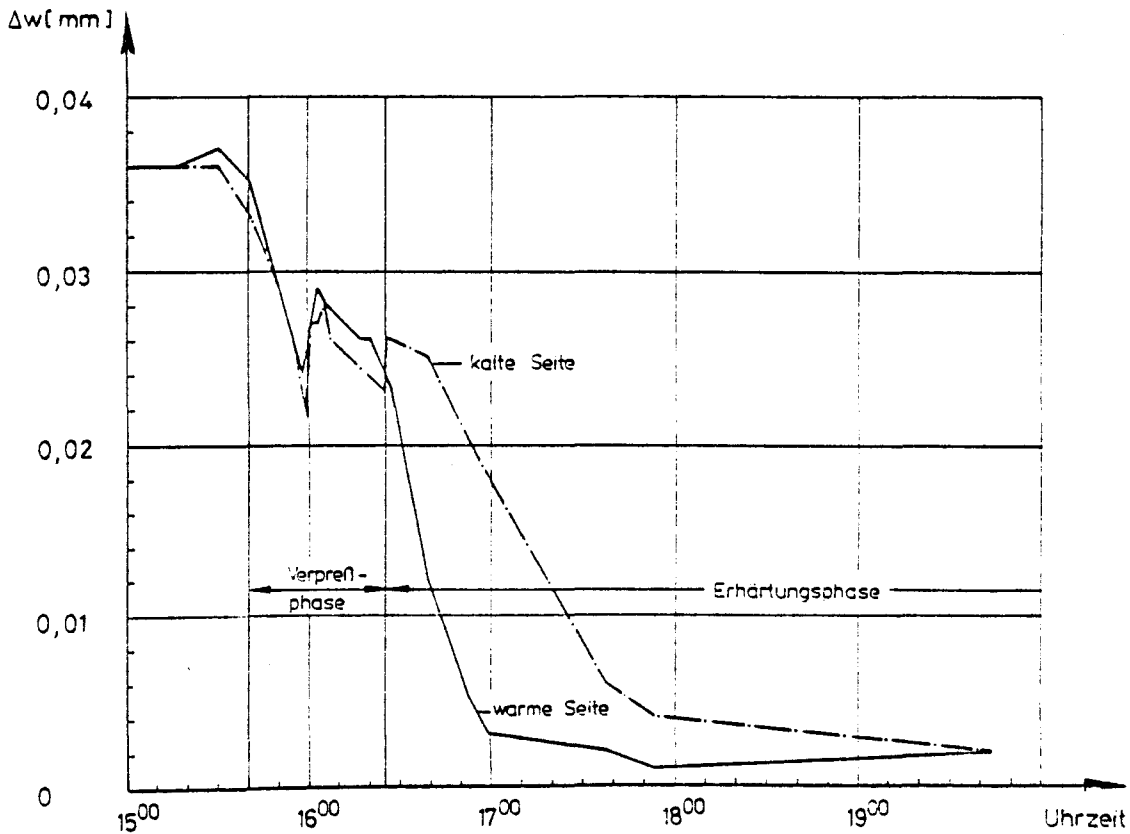


Bild 23 : Entwicklung der Rißbreitenänderungen
Riß 13 - Verpressen unter Schwellast

das Ausgangs- Δw von 0,03 mm auf 0,04 mm an, siehe Bild 24. Während der Verpreß- und Erhärtungsphase verhielt sich dieser Riß ähnlich wie die übrigen Risse. Allerdings ging das Δw nur bis 0,006 mm, nach weiteren 14 Stunden auf 0,003 mm zurück (Bild 25), was bedeutet, daß dieser Riß nicht die gleich gute Verpreßqualität hatte wie die übrigen Risse, was in der Wasserfüllung begründet ist.

Riß 2 wurde später unter statischer Last verpreßt. Sein Verhalten beim Verpressen der übrigen Risse unter Schwellast wurde beobachtet. Vergleichbar mit der oben geschilderten Vorverpreßphase von Riß 7 stieg das Δw von ca. 0,035 auf 0,045 mm an, um dann annähernd gleich zu bleiben, siehe Bild 26.

Die Messungen der Rißbreitenänderung Δw der o.g. Risse haben ergeben, wie aus Bild 26 zu ersehen, daß die durch Schwellbeanspruchung hervorgerufene Rißbreitenänderung Δw sich in einer Zeitspanne von rd. 2 Stunden nach Verpreßende um rd. 90 % verringert hat. Nach einer weiteren Stunde (rd. 3 Stunden nach Verpreßende) kann allgemein vom Erreichen eines Zustand-I-ähnlichen Zustandes gesprochen werden. Weiterhin tritt der Temperatureinfluß auf das Härungsverhalten des Reaktionsharzes deutlich hervor; die Rißbreitenänderungen verringern sich auf der warmen Seite schneller als auf der kalten Seite, was auf eine schnellere Aushärtung des Harzes auf dieser Balkenseite hindeutet.

Aufgrund dieser Meßergebnisse kann davon ausgegangen werden, daß die Erhärtung des Reaktionsharzes der Formulierung 3 rd. 3 Stunden nach Verpreßende zum größten Teil abgeschlossen ist.

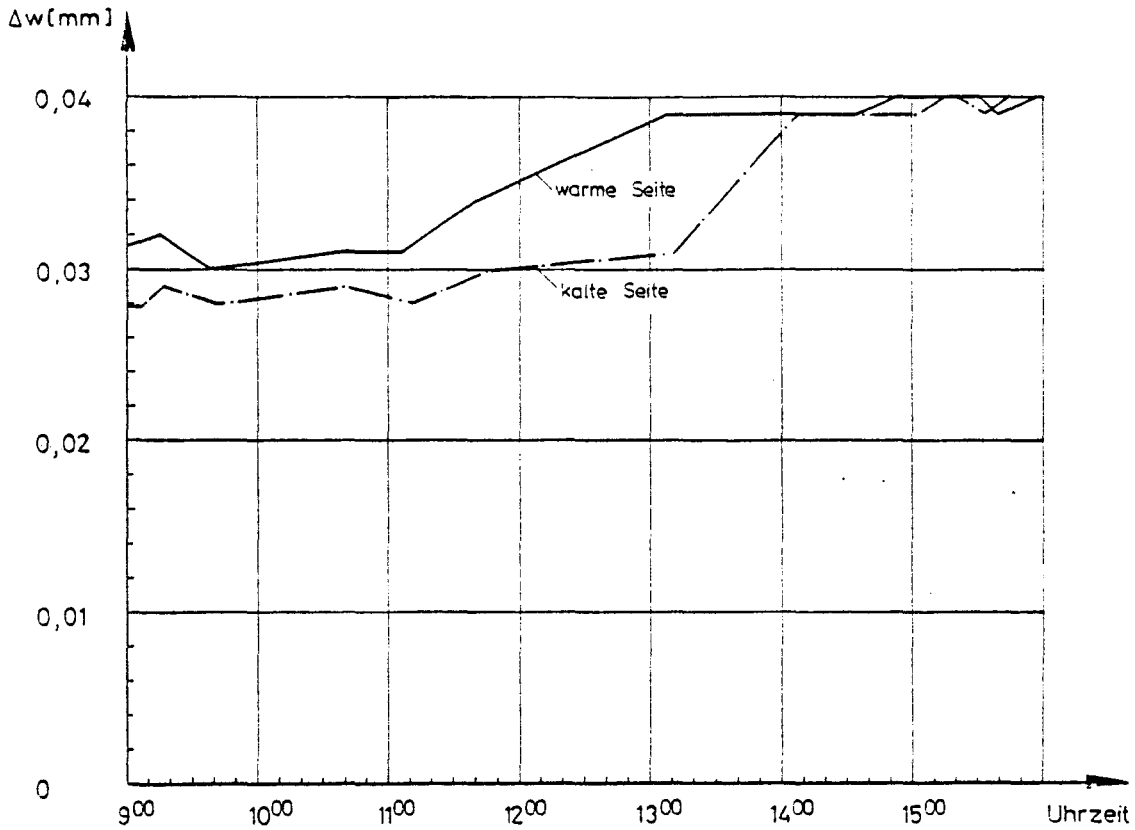


Bild 24 : Entwicklung der Rißbreitenänderungen
Riß 7 - Vorverpreßphase

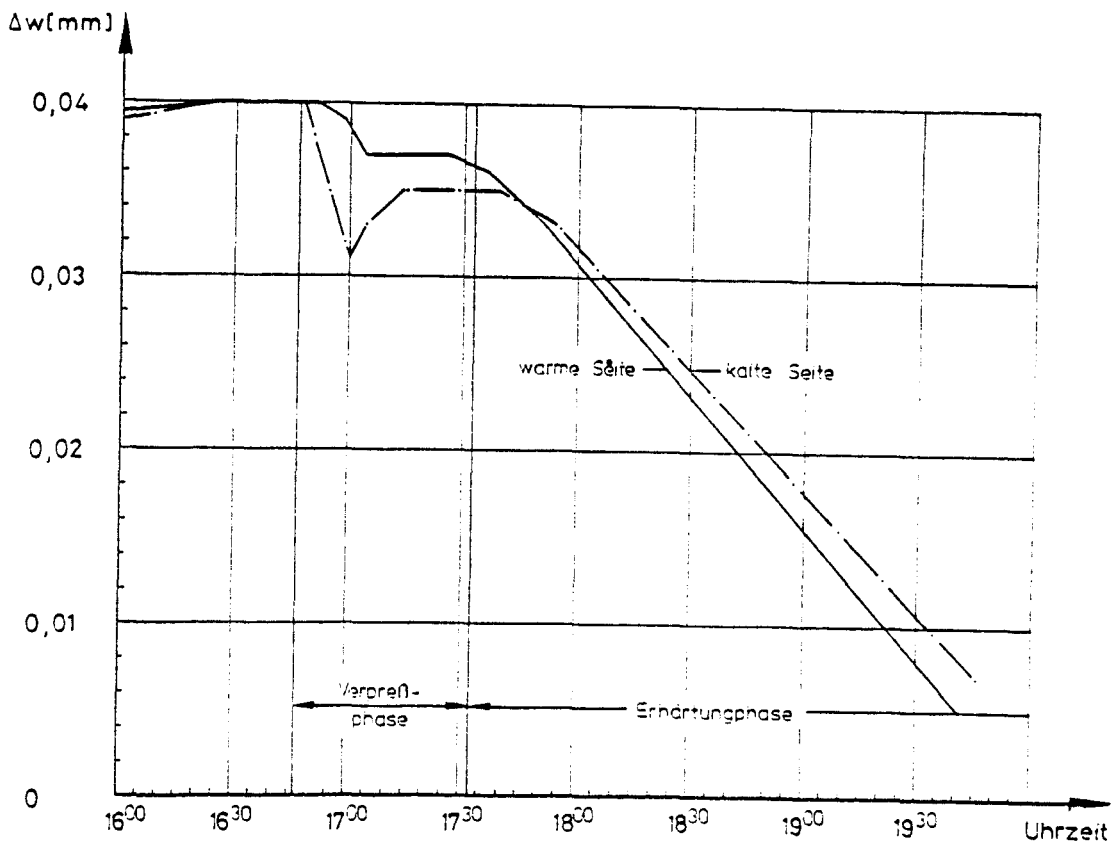


Bild 25 : Entwicklung der Rißbreitenänderungen
Riß 7 - Verpressen unter Schwelllast

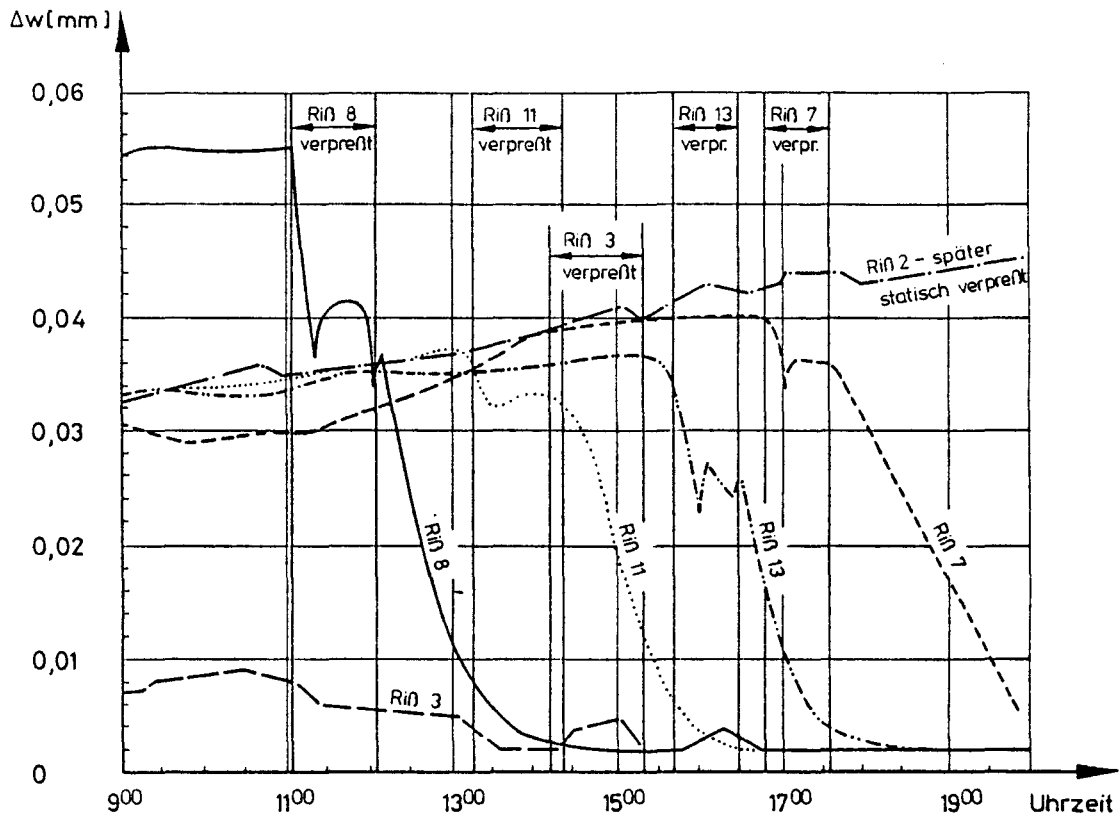


Bild 26 : Entwicklung der Rißbreitenänderungen
Verpressen der Risse unter Schwelllast

Höhenlage - s.Bild -	Riß 4	Riß 5	Riß 9	Riß 11
c	~ 2 mm	nicht eindeutig erkennbar		
a	> 3 mm	~ 5 mm	~ 4 mm	> 3 mm

Tabelle 18: Karbonatisierungstiefen von Balken 1

Höhenlage - s. Bild -	Riß 4	Riß 6	Riß 11	Riß 13
c	~ 6 mm	~ 2 mm	~ 2 mm	~ 2 mm
a	~ 5 mm	~ 6 mm	~ 2 mm	~ 1 mm

Tabelle 19: Karbonatisierungstiefen von Balken 2

Höhenlage - s. Bild -	Riß 4	Riß 6	Riß 10	Riß 12
c	nicht eindeutig erkennbar			> 3 mm
a	"	> 5 mm	> 5 mm	> 3 mm

Tabelle 20: Karbonatisierungstiefen von Balken 3

5.4 Kontrolle der Karbonatisierungstiefen

An den Bohrkernen aus den mit CO₂ begasten Rissen aller drei Balken wurde die tatsächliche Karbonatisierungstiefe wie folgt kontrolliert:

Nachdem die Segmente "a" und "c", siehe Bild 19, für die Erstellung der Probewürfel vom Kern abgetrennt waren, wurde von dem Reststück eine weitere 1 cm dicke Scheibe abgeschnitten; sie wurde über eine Kante so gebrochen, daß ein Teil des verpreßten Risses im Bruchbereich lag. Mittels Phenolphthalein konnten dann die tatsächlichen Karbonatisierungstiefen festgestellt werden. Sie sind in den Tabellen 18 bis 20 wiedergegeben.

5.5 Rasterelektronenmikroskopie

Als Abbildungsmethode für die im Vordergrund des Interesses stehende Verbundzone zwischen Injektionsharz und Rißufer hat sich die Rasterelektronenmikroskopie als besonders geeignet erwiesen. Wie im folgenden aufgezeigt, erlaubt diese mikromorphologische Untersuchungsmethode, das Adhäsionsverhalten von Rißverpressungen unter dem Einfluß baupraktischer Randbedingungen bei hohen Vergrößerungen zu beurteilen.

Da sich der chemische und hygrische Zustand der Rißflanken als wichtiger Parameter erwiesen hat, wird die folgende Darstellung der Ergebnisse in drei zustandspezifische Kapitel unterteilt, die sich mit trockenen, karbonatisierten und nassen Rißufern befassen.

5.5.1 Trockene Risse

Als trocken seien hier solche Risse eingestuft, die in Betonen üblicher Ausgleichsfeuchte - bezogen auf das Klima 23/50 - verlaufen. Das Verpressen statisch belasteter Risse mit dem Harzsystem 1 gestaltete sich bei Temperaturen bis zu + 25 °C im allgemeinen problemlos. Der mikromorphologisch untersuchte Verbund war in der Regel nicht zu beanstanden.

Bild 27 gibt einen typischen Rißverlauf wieder; ausweislich des unten rechts im Bild angeordneten Maßstriches - hier bedeutet U stets μm - schwankt die Rißbreite zwischen 0,15 und 0,30 mm. Bis auf wenige Luftblasen ist der Riß vollständig gefüllt. Die an beiden Rißflanken gleichermaßen einwandfreie Ankopplung dokumentiert die 10fach höhere Vergrößerung in Bild 28. Bei noch stärkerer Vergrößerung wird deutlich, daß sowohl glatte Zuschlagkornoberflächen (Bild 29) als auch rauhe Zementstein-Rißflanken (Bild 30) vollständig vom Reaktionsharz benetzt werden.

Beim Injizieren schwellendbeanspruchter, aber ansonsten gleichartiger Risse werden vergleichbare positive Ergebnisse erzielt, selbst wenn - wie in den Bildern 31 und 32 - die Rißbreite unter 0,15 mm liegt. Trotz partieller Verbundverluste im Korngrenzbereich (Bild 33) ist das Verpreßergebnis positiv zu bewerten.

Injiziert man die Risse bei einer Betontemperatur von + 35 °C, so treten unabhängig von der Belastungsart (statisch/schwellend) häufig feinste Ablösungen in der Kontaktzone Zuschlag/Harz auf (Bilder 34 und 36). Dagegen erweist sich der Kontakt zur Zementsteinmatrix als günstig und frei von Ablösungserscheinungen (Bilder 35 und 37).

Mit dem Harzsystem 2 wurden unter statischer Last durchweg ausgezeichnete Ergebnisse erzielt. Diese Feststellung bezieht sich sowohl auf die Vollständigkeit der Verfüllung (Bild 38) als auch auf die Benetzung der Rißflanken. Bei höheren Vergrößerungen verdeutlichen die rasterelektronenmikroskopischen Gefügaufnahmen, daß die rauhe, stark verästelte Zementstein-Rißflanke (Bild 39) ebenso wie die Zuschlagkorn-Oberflächen (Bild 40) fugenlos an das Reaktionsharz angekoppelt sind. Eine Beeinflussung der Kontaktzone durch die Betontemperatur war nicht zu verzeichnen.

Unter Schwelllastverhältnissen wurde dagegen eine ausgeprägte Porenbildung im Harz beobachtet (Bild 41). In einigen Fällen traten ferner Ablösungen vom Zuschlagkorn auf (Bild 42),

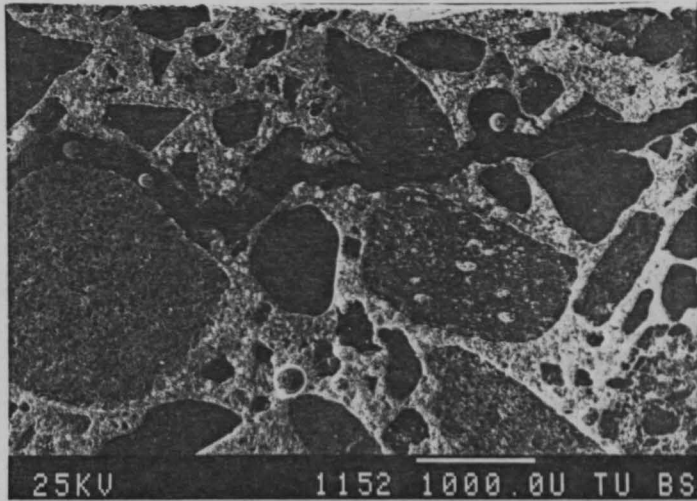


Bild 27 :

Statische Belastung;
 Harzsystem 1;
 Beton: trocken; +25 °C

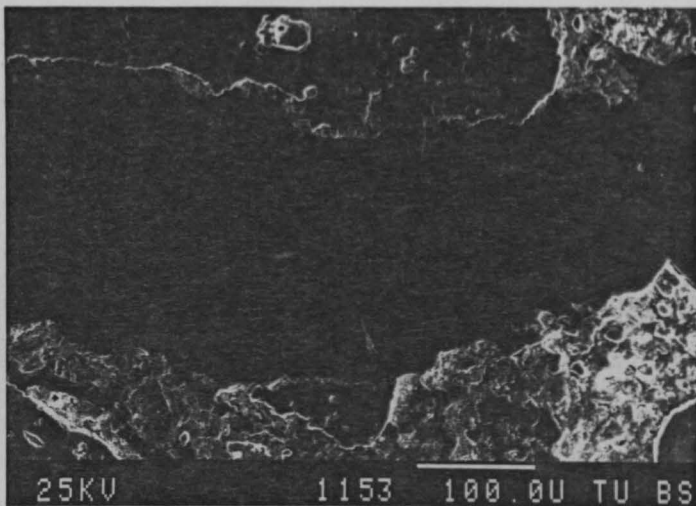


Bild 28 :

Detail aus Bild 27;
 Harzsystem 1;
 Beton: trocken; +25 °C

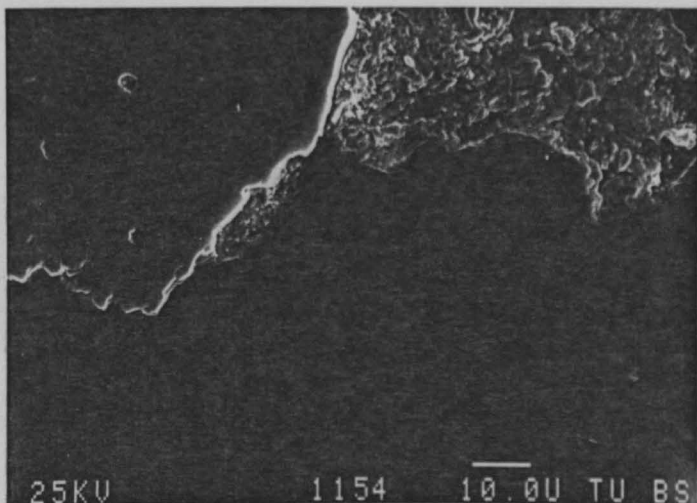


Bild 29 :

Detail aus Bild 27
 Oben: Zuschlag u. Zementstein
 Unten: Harz

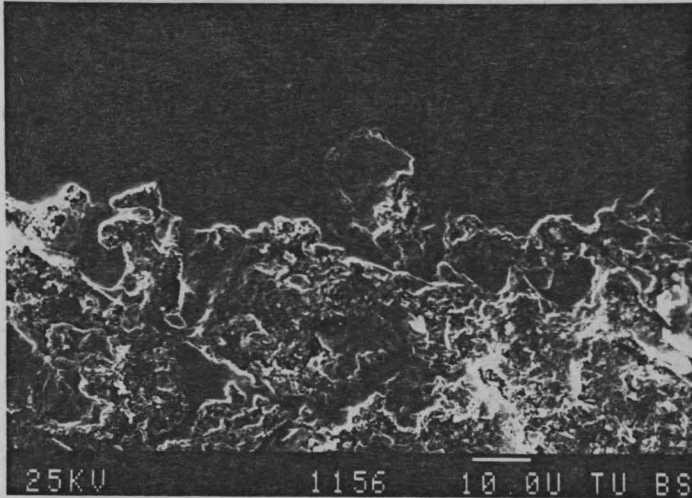


Bild 30 :

Detail aus Bild 27

Oben: Harz

Unten: Zementstein

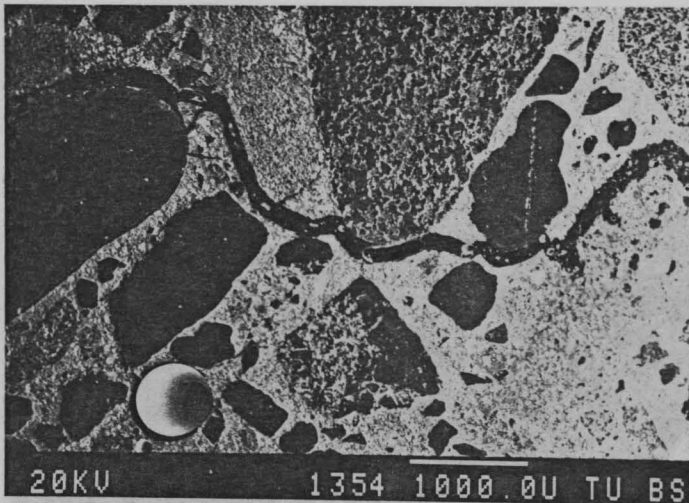


Bild 31 :

Schwellbeanspruchung;

Harzsystem 1;

Beton: trocken; +25 °C

Oben: Zuschlag

Unten: Harz

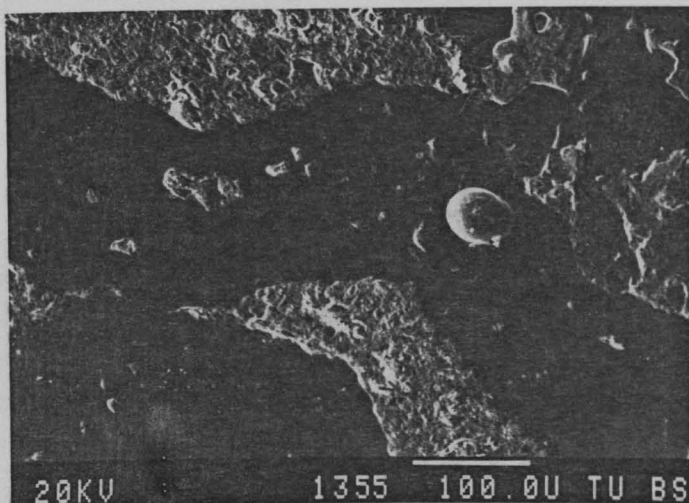


Bild 32 :

Detail aus Bild 31

Harzsystem 1;

Beton: trocken; +25 °C

Oben: Harz

Unten: Zementstein

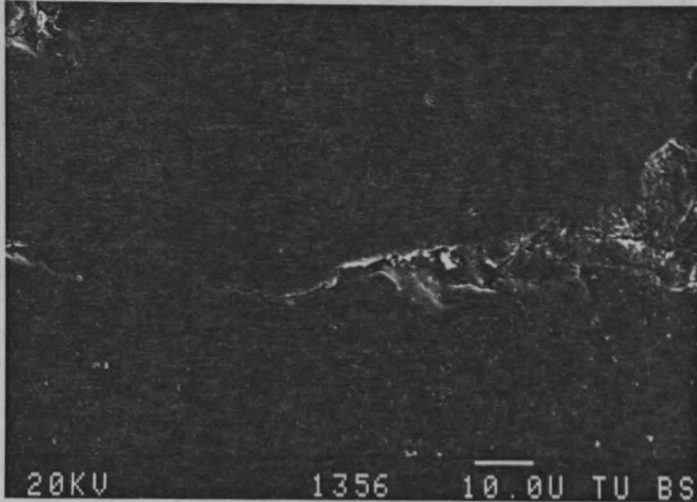


Bild 33 :

Detail aus Bild 31

Oben: Harz

Unten: Zuschlag

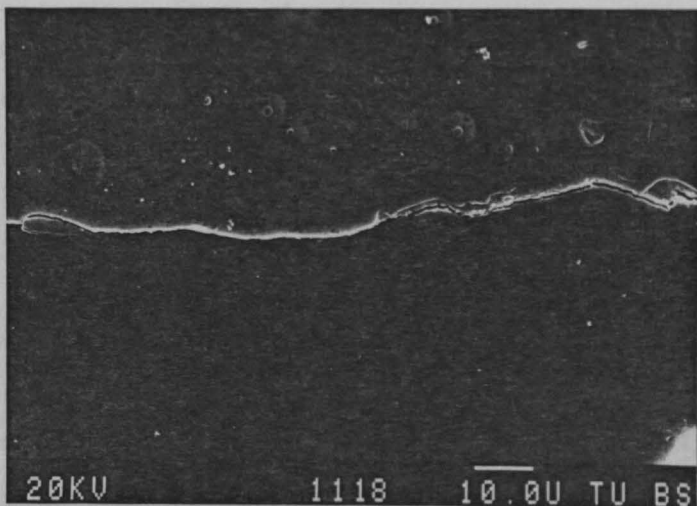


Bild 34 :

Statische Belastung;

Harzsystem 1;

Beton: trocken; +35 °C

Oben: Zuschlag

Unten: Harz

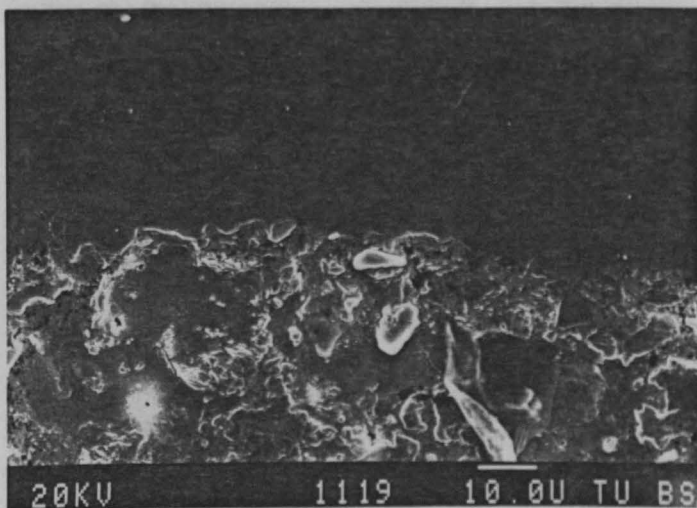


Bild 35 :

Statische Belastung;

Harzsystem 1;

Beton: trocken; +35 °C

Oben: Harz

Unten: Zementstein

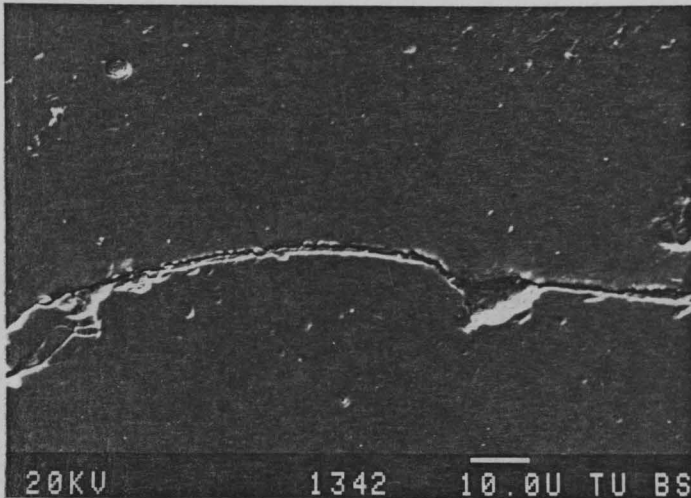


Bild 36 :

Schwellbeanspruchung;
 Harzsystem 2;
 Beton: trocken; +35 °C
 Oben: Harz
 Unten: Zuschlag

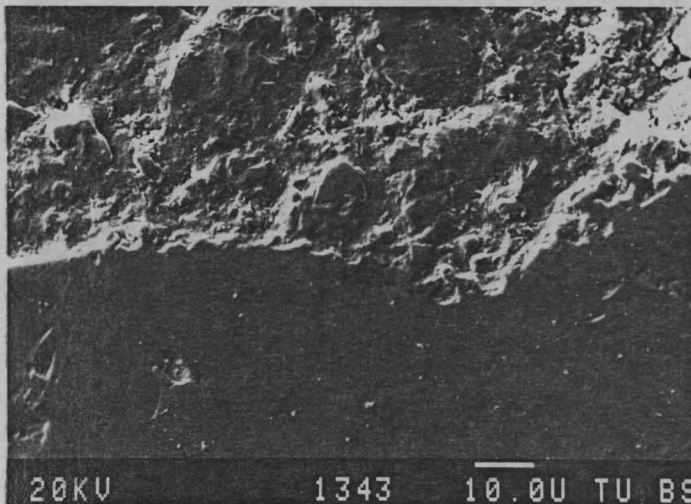


Bild 37:

Schwellbeanspruchung;
 Harzsystem 2;
 Beton: trocken; +35 °C
 Oben: Zementstein
 Unten: Harz

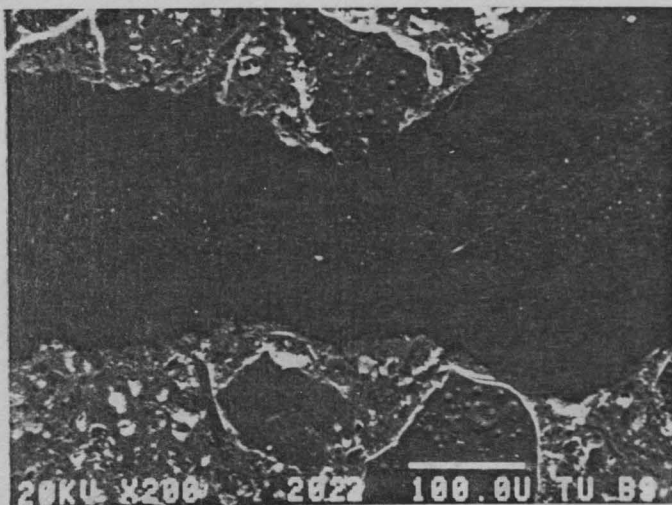


Bild 38 :

Statische Belastung;
 Harzsystem 2;
 Beton: trocken; +25 °C

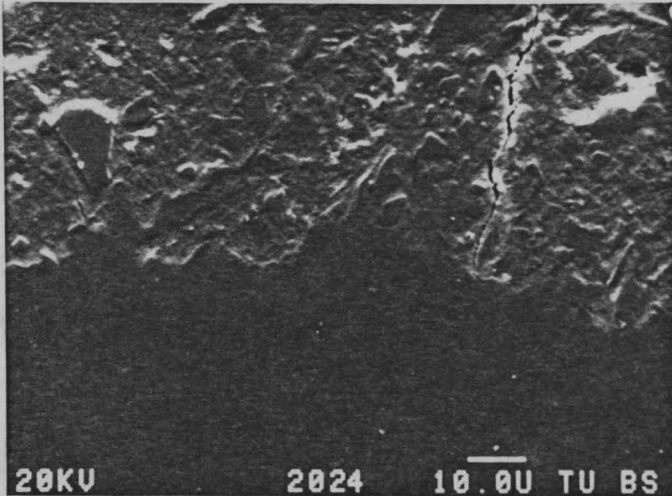


Bild 39 :
Detail aus Bild 38
Oben: Zementstein
Unten: Harz

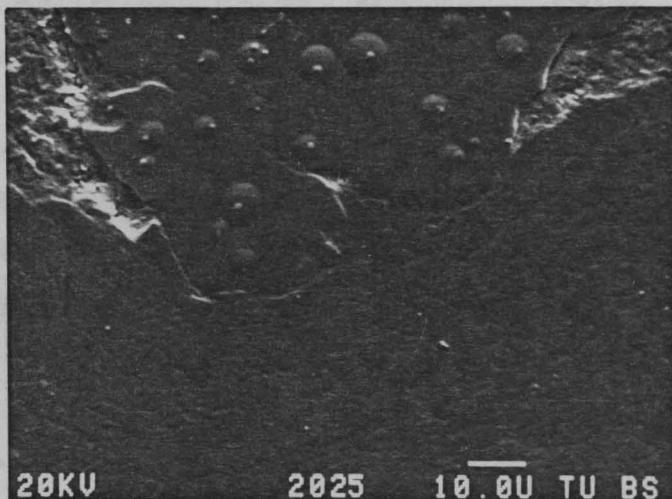


Bild 40 :
Detail aus Bild 38
Oben: Zuschlag
Unten: Harz

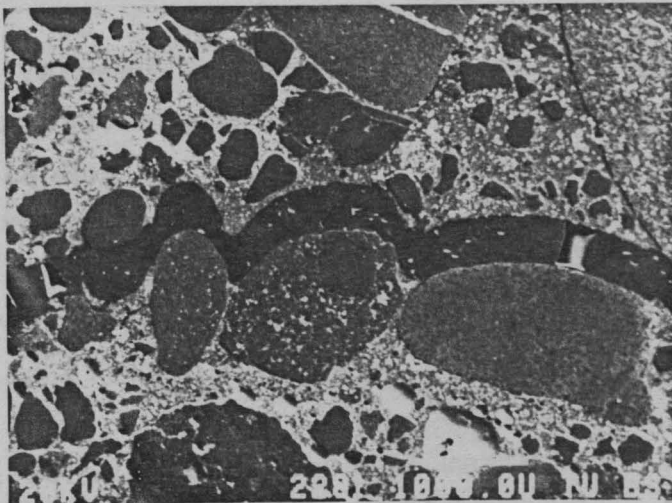


Bild 41 :
Schwellbeanspruchung;
Harzsystem 2;
Beton: trocken; +25 °C

wobei vorzugsweise breitere Rißbereiche dieses Phänomen zeigen; ursächlich dafür dürfte die hier wegen der größeren Bezugslänge verstärkt wirksame Schwindneigung des ungefüllten Epoxidharzes während der Vernetzungsreaktion sein.

Ungleich ungünstiger schneidet das höherviskose Epoxidharzsystem 3 ab; zwar ist trotz der relativ hohen Viskosität und der reaktionsbedingt kurzen Verarbeitungszeit selbst bei schmalen Rissen von weniger als 0,1 mm Breite noch eine vollständige Verfüllung erzielbar, was Bild 43 am Beispiel aus statisch belasteten Rissen anschaulich belegt. Bei höherer Vergrößerung fallen jedoch feindispers über den gesamten Harzquerschnitt verteilte Poren auf (Bild 44); darüber hinaus sind partielle Adhäsionsverluste zu verzeichnen.

Während das Benetzungsverhalten durch Schwellbeanspruchung nicht weiter verschlechtert wird, treten insbesondere in Kombination mit erhöhten Betontemperaturen verstärkt makroskopische Poren und Hohlräume im Reaktionsharzsystem 3 auf (Bild 45).

5.5.2 Karbonatisierte Risse

Beim Verpressen karbonatisierter Risse konnten durchweg bessere Ergebnisse als bei trockenen Rissen erzielt werden.

Bei Verwendung des Harzsystems 1 ergab sich bei statischer Beanspruchung bis auf eine Anzahl großer Poren im Harz eine vollständige Verfüllung des Risses (Bilder 46 und 47). Die mikromorphologische Untersuchung des adhäsiven Verbundes beweist die meist einwandfreie Ankopplung des Reaktionsharzes sowohl am Zuschlagkorn (Bild 48) als auch am Zementstein (Bild 49).

Bei Schwellbeanspruchung wurde zwar ebenfalls eine vollständige Verfüllung der Risse erreicht, doch ergab sich einerseits eine etwas größere Neigung zur Porenbildung (Bild 50), andererseits eine Schwächung des Verbundes zwischen Reak-

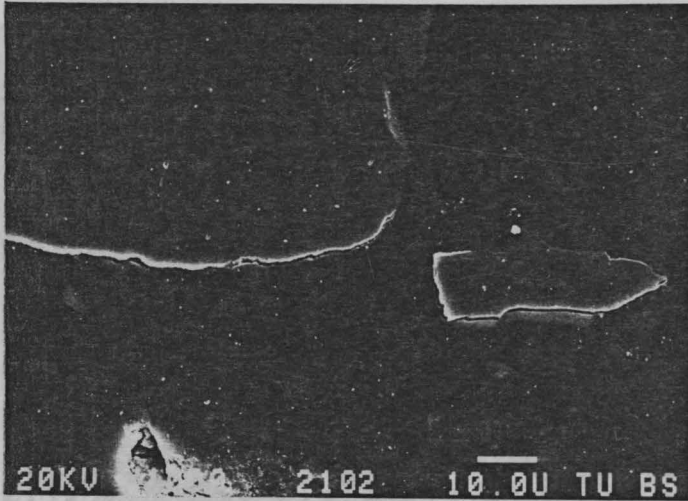


Bild 42 :
 Schwellbeanspruchung;
 Harzsystem 2;
 Beton: trocken; +25 °C
 Oben: Zuschlag
 Unten: Harz

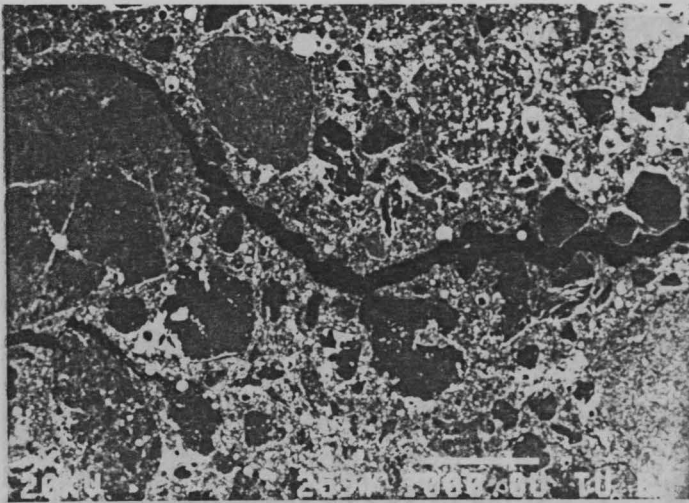


Bild 43 :
 Statische Belastung;
 Harzsystem 3;
 Beton: trocken; +25 °C

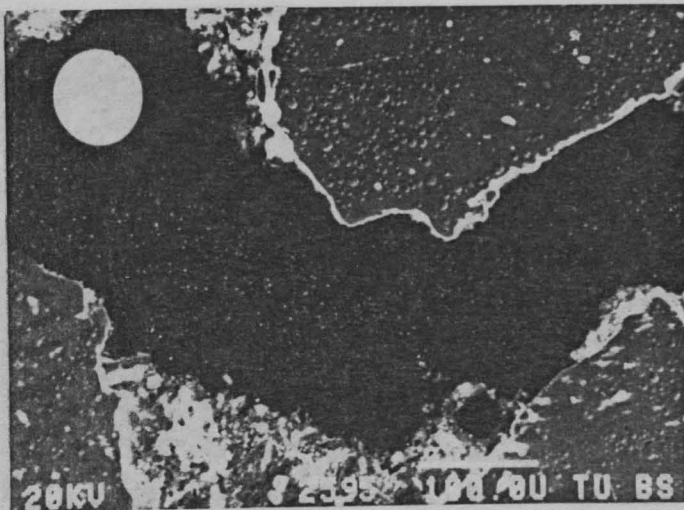


Bild 44 :
 Detail aus Bild 43

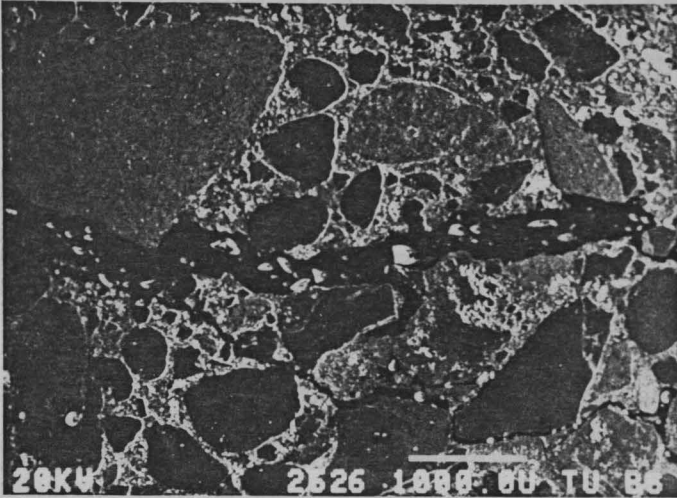


Bild 45 :

Schwellbeanspruchung;
 Harzsystem 3;
 Beton: trocken; +35 °C

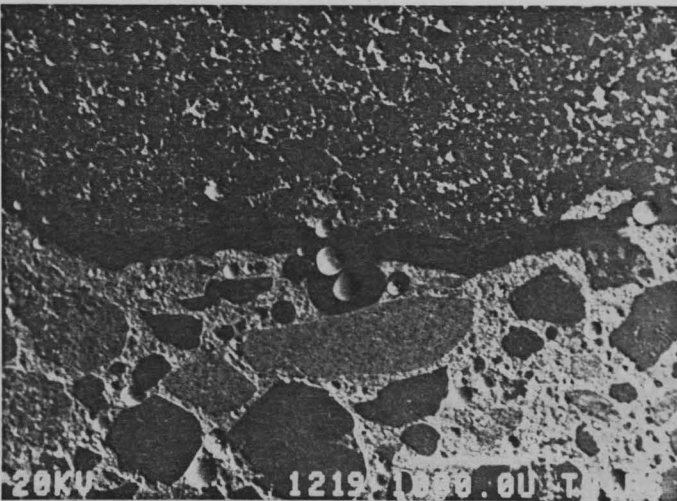


Bild 46 :

Statische Beanspruchung;
 Harzsystem 1;
 Beton: karbonatisiert, +35 °C



Bild 47 :

Detail aus Bild 46

Harzsystem 1;
 Beton: karbonatisiert, +35 °C

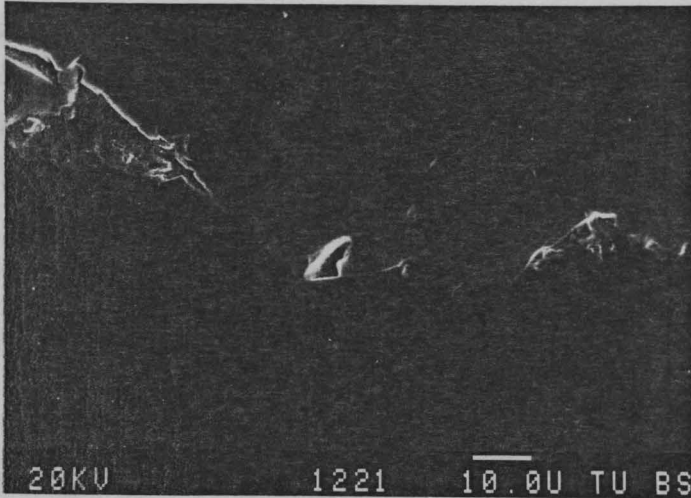


Bild 48 :

Detail aus Bild 46

Oben: Zuschlag

Unten: Harz

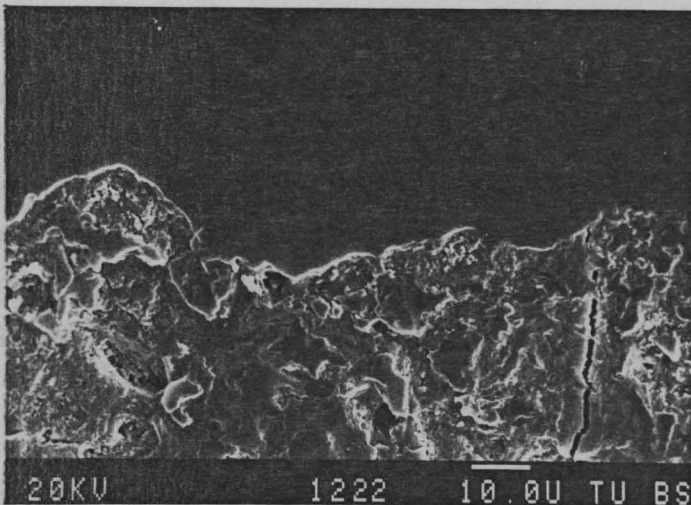


Bild 49 :

Detail aus Bild 46

Oben: Harz

Unten: Zementstein

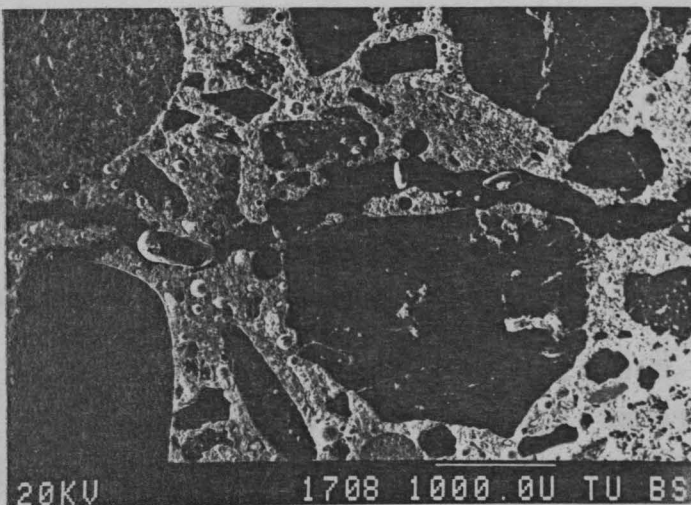


Bild 50:

Schwellbeanspruchung;

Harzsystem 1;

Beton: karbonatisiert; +25 °C

tionsharz und Zuschlagkorn durch lokale Ablösungen, wie aus Bild 51 zu ersehen ist. Eine signifikante Temperaturabhängigkeit wurde bei keiner der beiden Belastungsarten festgestellt.

Mit dem Harzsystem 2 ist die Benetzung karbonatisierter Rißflanken unabhängig vom untersuchten Temperaturbereich und der Belastungsart außerordentlich gut. Trotz intensiver Suche konnten Verbundverluste nicht nachgewiesen werden. Als nachteilig erweist sich lediglich die ausschließlich auf schwellbeanspruchte Risse beschränkte Neigung zur Bildung von Makroporen (Bild 52).

Im Falle des höherviskosen Harzsystems 3 sind die Benetzungsverhältnisse an den karbonatisierten Rißflanken ebenfalls günstiger als die bei trockenen Rissen erzielbaren, sodaß sie immer noch als gut bezeichnet werden können. Bei diesem Harz ist unter Einwirkung einer Schwelllast unabhängig von der Betontemperatur eine sichtbare Verschlechterung sowohl des Porenbildes (Bild 53) als auch des Verbundes (Bild 54) zu verzeichnen.

Da die Risse zwecks Karbonatisierung der Rißflanken über einen Zeitraum von rund drei Wochen mit trockenem Kohlendioxid durchströmt wurden, ist davon auszugehen, daß die Rißoberflächen eine geringere Feuchtigkeit als die im vorigen Abschnitt als trocken bezeichneten Rißoberflächen besaßen. Insofern sind die qualitativ besseren Verpreßergebnisse nicht verwunderlich.

5.5.3 Nasse Risse

Im Gegensatz zu den zumindest mit dem Harzsystem 2 bei ausgleichsfeuchten sowie karbonatisierten Rissen erzielten positiven Ergebnissen sind die an nassen Rissen gewonnenen Resultate insgesamt kaum als befriedigend zu bewerten.

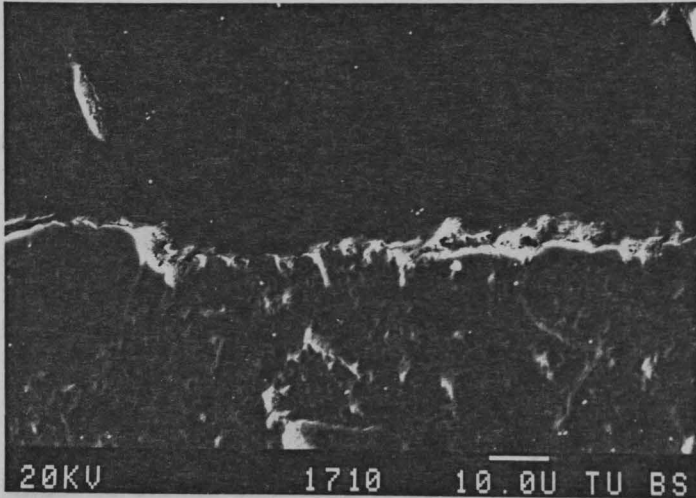


Bild 51 :

Detail aus Bild 50

Oben: Harz

Unten: Zuschlag

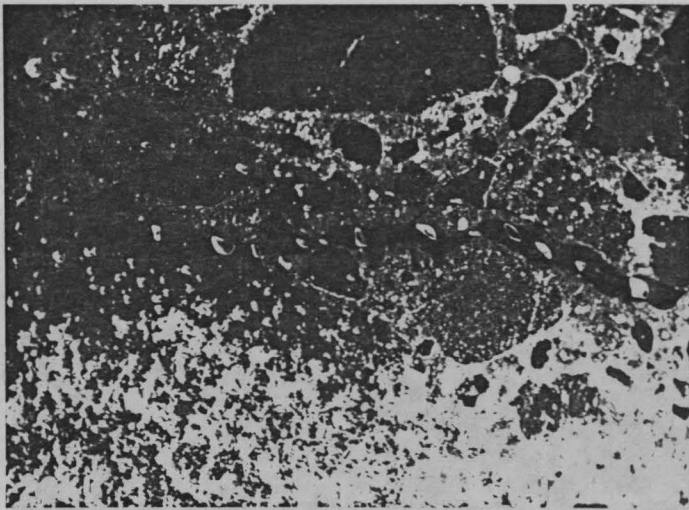


Bild 52 :

Schwellbeanspruchung;

Harzsystem 2;

Beton: karbonatisiert; +25 °C

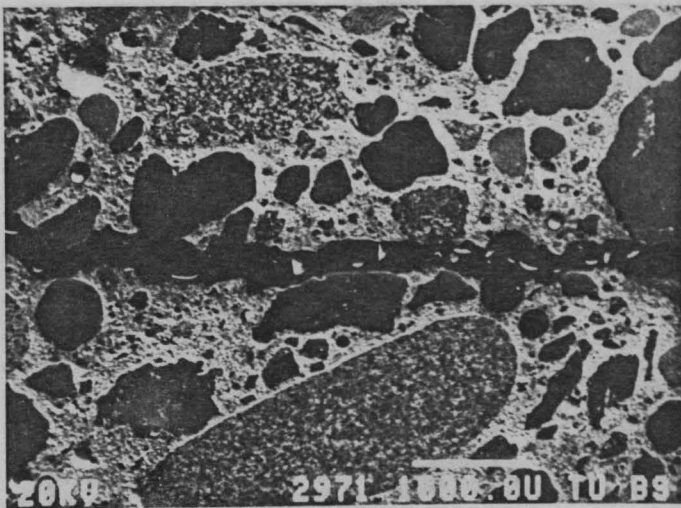


Bild 53 :

Schwellbeanspruchung;

Harzsystem 3;

Beton: karbonatisiert; +35 °C

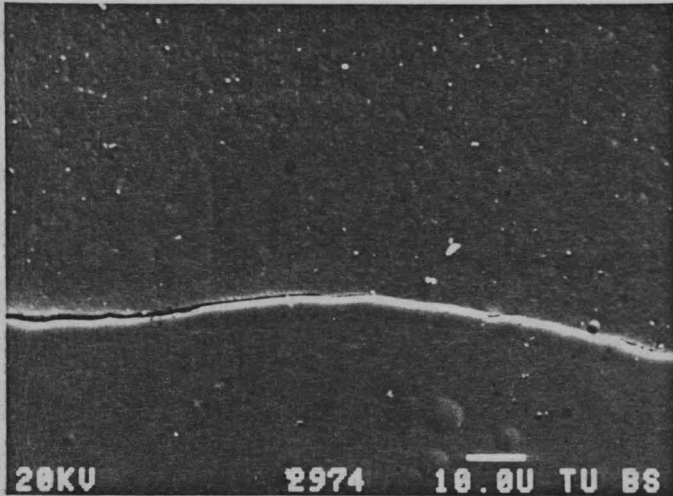


Bild 54 :
Detail aus Bild 53
Oben: Harz
Unten: Zuschlag

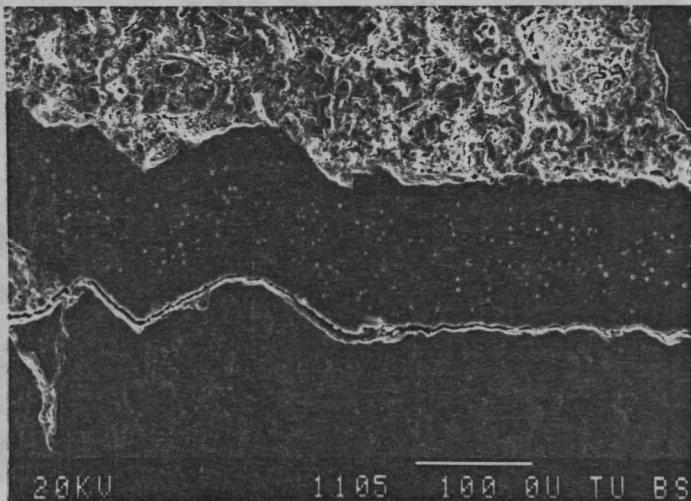


Bild 55 :
Statische Belastung;
Harzsystem 1;
Beton: naß; +25 °C

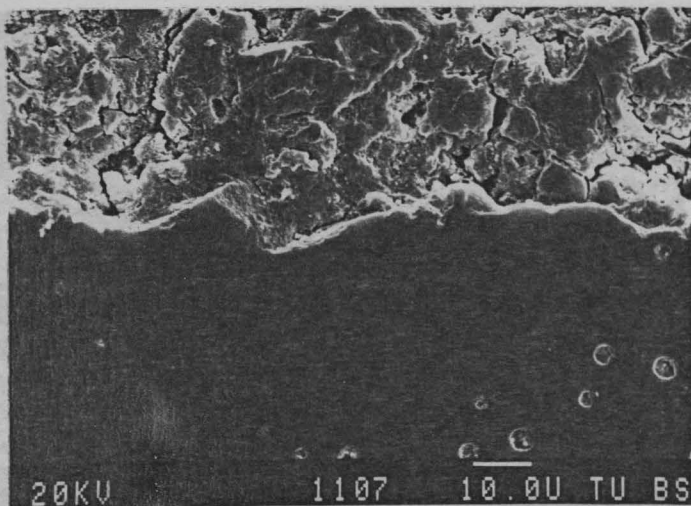


Bild 56 :
Detail aus Bild 55
Oben: Zementstein
Unten: Harz

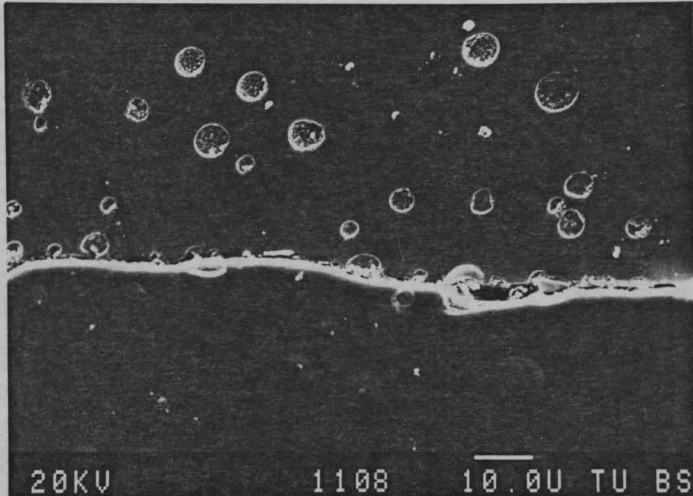


Bild 57 :

Detail aus Bild 55

Oben: Harz

Unten: Zuschlag

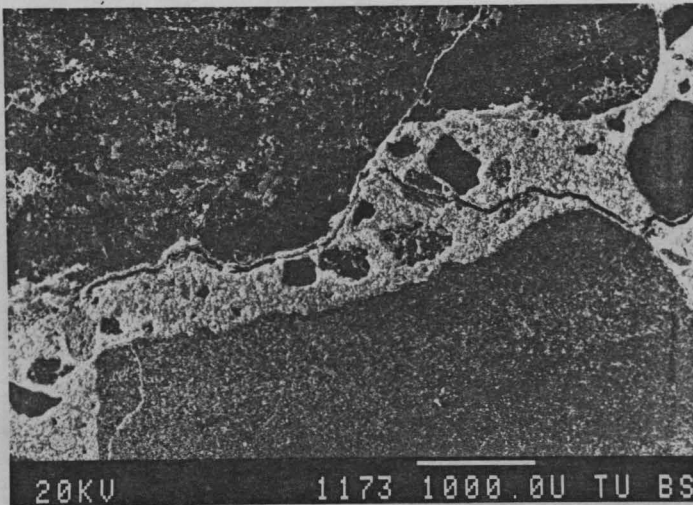


Bild 58 :

Schwellbeanspruchung;

Harzsystem 1;

Beton: naß; +25 °C

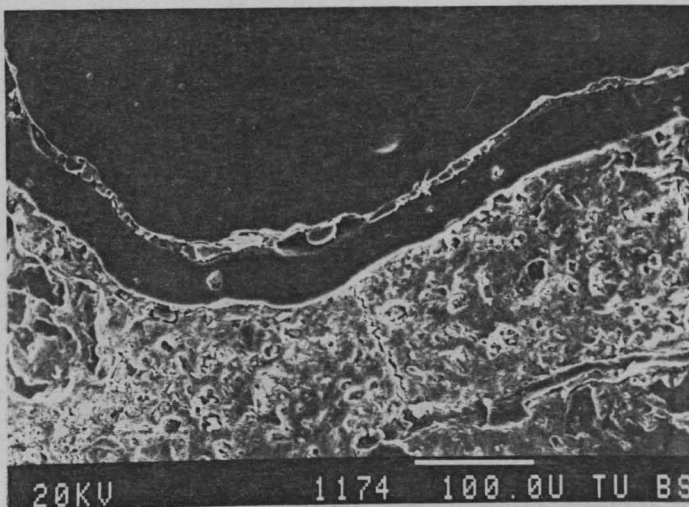


Bild 59 :

Detail aus Bild 58

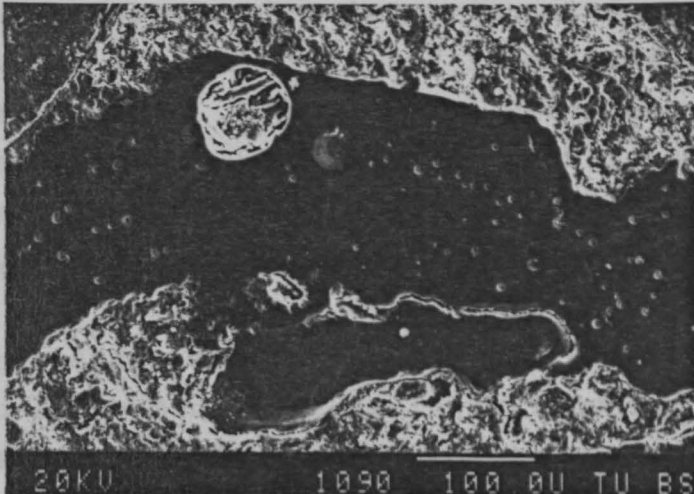


Bild 60 : Porosität auf,
Statische Belastung;
Harzsystem 1;
Beton: naß; +35 °C

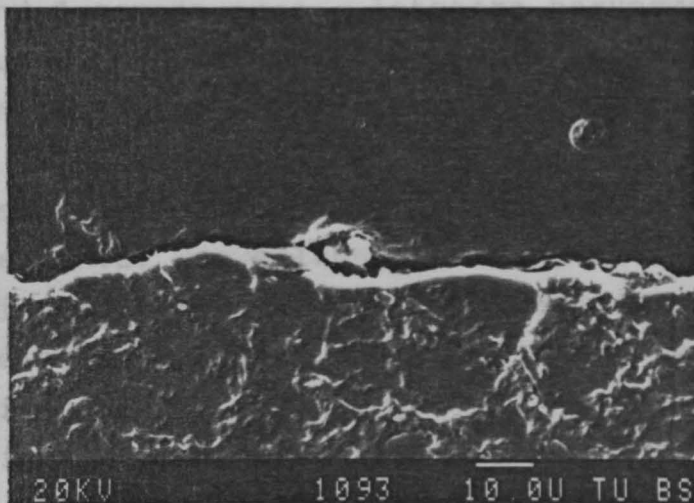


Bild 61 :
Detail aus Bild 60
Oben: Harz
Unten: Zuschlag

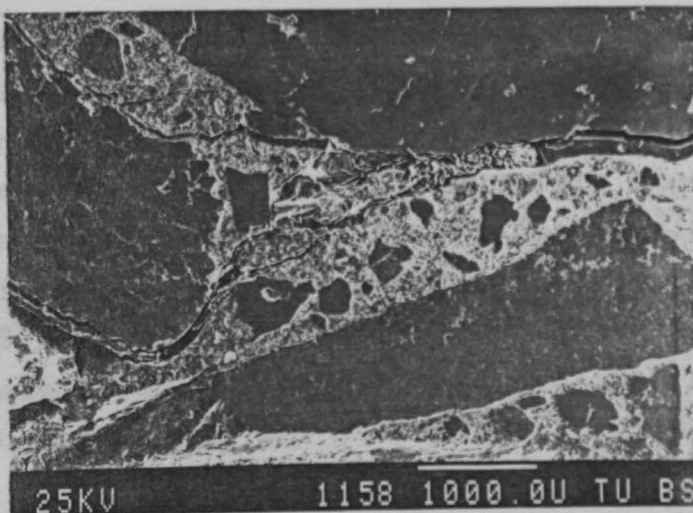


Bild 62 : Zementstein
Schwellbeanspruchung;
Harzsystem 1;
Beton: naß; +35 °C

Das Harzsystem 1 weist meist eine ausgeprägte Porosität auf, wie es die Bilder 55 und 58 am Beispiel eines unter statischer bzw. schwellender Belastung verpreßten Risses verdeutlichen. Die Adhäsion des Harzes an Korngrenzen und Zementstein ist unabhängig von der Belastungsart und Temperatur in weiten Bereichen gestört (Bilder 55 bis 63).

Interessante Details sind den Bildern 55, 60 und 62 insofern zu entnehmen, als das Injektionsharz der Kontur der Rißflanke erstaunlich präzise folgt, was auf eine ursprünglich gute Benetzung hindeutet; offenbar war der erzielte Verbund jedoch so mangelhaft, daß er der Superposition von Schwind- und Zugspannungen - letztere hervorgerufen durch die statische bzw. schwellende Belastung - sowie dem Überlastungsversuch nicht standzuhalten vermochte.

Generell gesehen ist der Verbund nasser Risse beim Verpressen unter Schwellbeanspruchung nicht schlechter als bei statischer Last. Doch unabhängig von der Temperatur und der Belastungsart ist die Porosität sowie die Verfüllung des Risses mit dem Harzsystem 1 nur als mangelhaft zu bewerten. Einen völlig desolaten Zustand eines unter Schwelllast bei + 35 °C verpreßten nassen Risses geben die Bilder 62 und 63 wieder.

Hinsichtlich der Benetzung von Zuschlagkorn und Zementstein konnte mit den feuchtigkeitsverträglicheren Harzsystemen 2 und 3 ebenfalls kein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden, wobei die Belastungsart unerheblich ist. Eine einwandfreie Benetzung der Rißflanke wird nur selten erreicht. Die Regel stellen Verbundverluste der in den Bildern 64 und 65 gezeigten Art dar. Bezüglich Porosität verhält sich das Harzsystem 3 ausweislich der Bilder 65 und 66 wesentlich ungünstiger als das Harzsystem 2 (Bild 64).

Beim Verpressen gegen im Riß stehendes Wasser wurde letzteres vom Harz zwar weitgehend verdrängt, dennoch erzielte keines der verwendeten drei Harzsysteme eine ordnungsgemäße

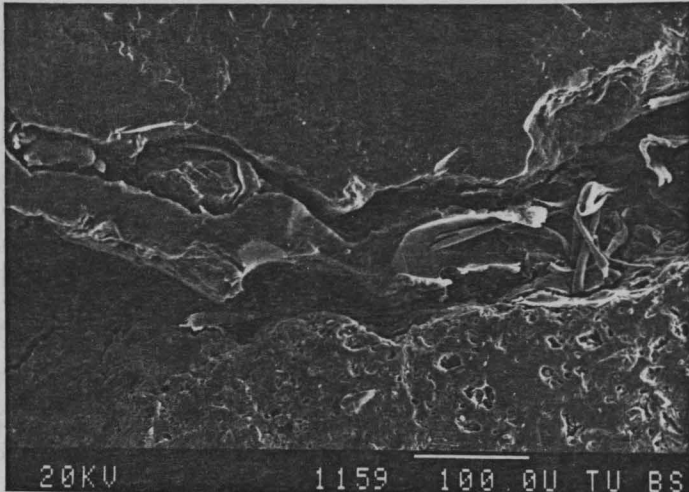


Bild 63 :
Detail aus Bild 62

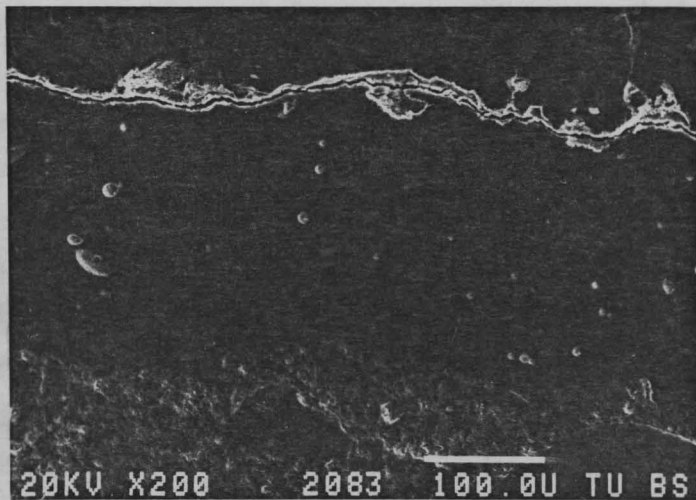


Bild 64 :
Schwellbeanspruchung;
Harzsystem 2;
Beton: naß; +35 °C

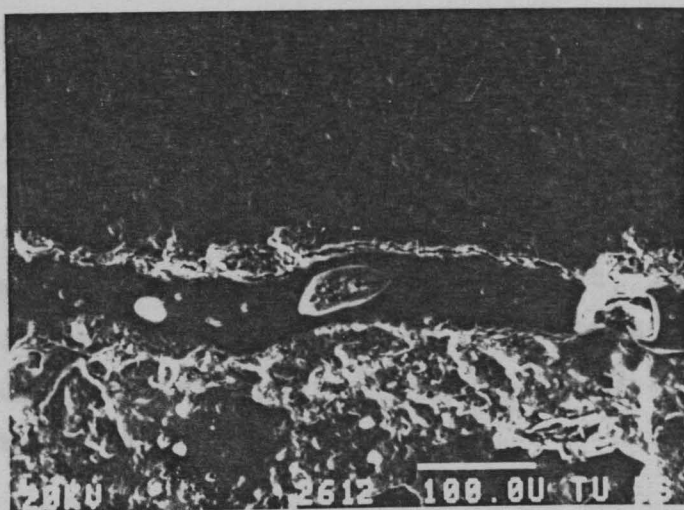


Bild 65 :
Schwellbeanspruchung;
Harzsystem 3;
Beton: naß; +35 °C

Benetzung der Rißflanken. Folglich wurde kein nennenswerter Harz-Beton-Verbund erreicht.

Um den Einfluß des Überlastungsversuchs auf das Adhäsionsverhalten der Rißverpressung beurteilen zu können, wurden jeweils am Ende der Aushärtungsphase der Harzsysteme 2 und 3 von statisch und schwellend belasteten nassen Rissen vor dem Überlastungsversuch Bohrkerne zur mikromorphologischen Untersuchung entnommen.

Die rasterelektronenmikroskopische Betrachtung der Adhäsionszonen ergab, daß ein nennenswerter Verbund zwischen Reaktionsharz und Zuschlagkorn auch bei diesen Proben nicht gegeben war (Bilder 67 bis 69). Im Vergleich zu überlasteten Rissen ist die Güte des Verbundes nur unwesentlich besser.

Mithin beruht der festgestellte mangelhafte Verbund in erster Linie auf der Anwesenheit von Feuchtigkeit im Rißflankenbereich; auf diese Weise wird eine chemisorptive Adhäsion der Epoxidharze an den Rißufern weitestgehend verhindert.

5.5.4 Risse in Beton mit Luftporenbildnerzusatz

Bild 70 zeigt den typischen Verlauf eines Risses in luftporrhaltigem Beton. Es ist deutlich erkennbar, daß der Riß eine Vielzahl von Poren erfaßt. Daneben wird der gute Füllgrad dieser Poren mit dem Verpreßharz veranschaulicht. Da die effektive Adhäsionsfläche durch die stark vergrößerte Oberfläche beträchtlich anwächst, ist neben dem adsorptiven Verbund eine zusätzliche geometrische mechanische Verklammerung gegeben, die sich letztlich positiv auf das Adhäsionsverhalten auswirkt.

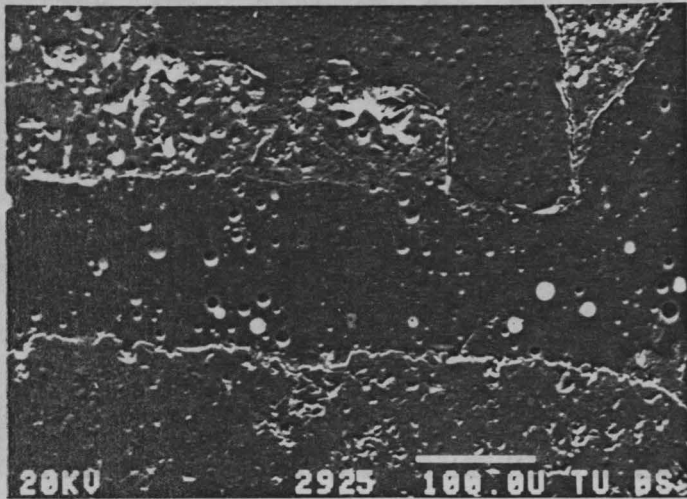


Bild 66 :

Statische Belastung;
Harzsystem 3;
Beton: naß; +25 °C

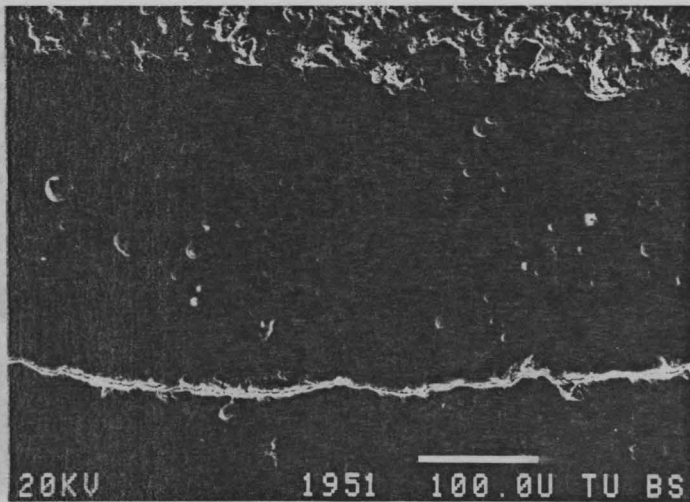


Bild 67 :

Schwellbeanspruchung;
Harzsystem 2;
Beton: naß; +25 °C
Oben: Zementstein
Mitte: Harz
Unten: Zuschlag

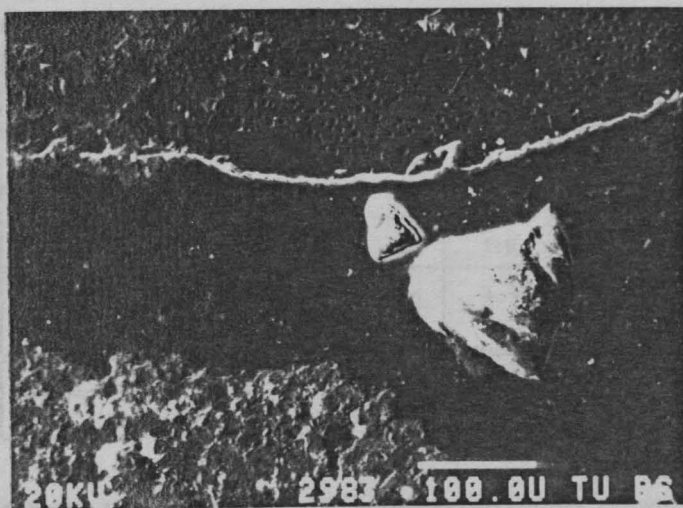


Bild 68 :

Schwellbeanspruchung;
Harzsystem 3;
Beton: naß; +35 °C
ohne Überlastung

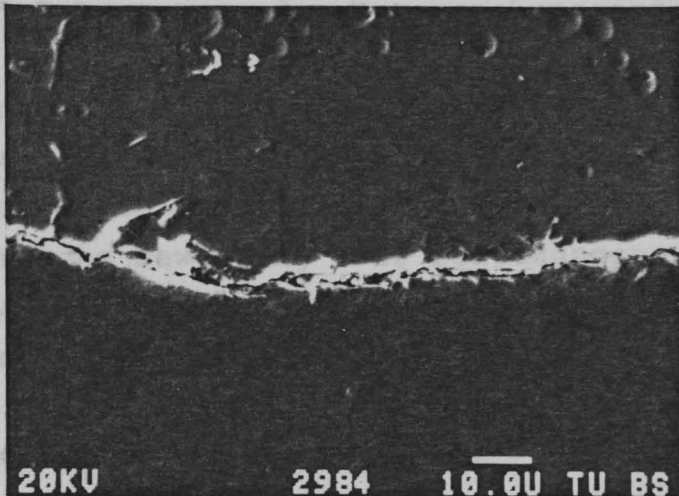


Bild 69 :

Detail aus Bild 68

Oben: Zuschlag

Unten: Harz

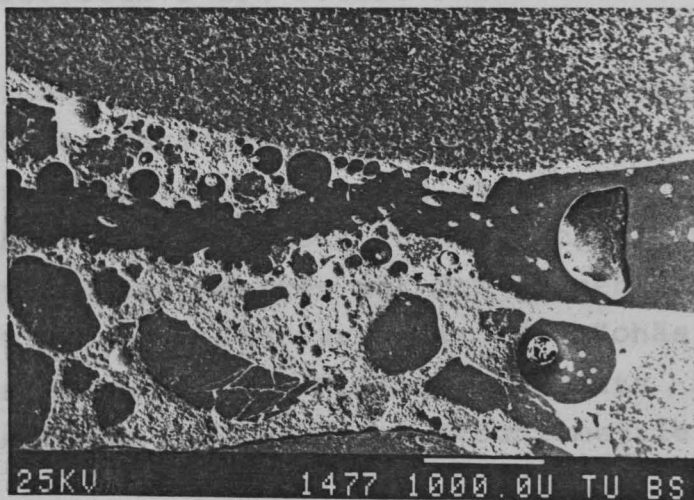


Bild 70 :

Schwellbeanspruchung;

Harzsystem 1;

Beton: trocken; +25 °C

Rißflanke	Be- lastung	Harzsystem 1		Harzsystem 2		Harzsystem 3	
		Verbund	Poren	Verbund	Poren	Verbund	Poren
trocken	st	2,0	2,0	1,0	1,0	3,0	3,0
	sw	2,5	4,0	2,0	3,0	3,0	4,0
karbona- tisiert	st	2,0	3,0	1,0	1,0	2,0	2,0
	sw	2,5	3,0	1,0	4,0	2,5	3,0
naß	st	3,0	5,0	3,0	3,0	3,0	5,0
	sw	4,0	4,0	3,0	4,0	3,0	5,0
Mittel- wert	st	2,3	3,3	1,7	1,7	2,7	3,3
	sw	3,0	3,7	2,0	3,7	2,8	4,0

Tabelle 21: Bewertung von Benetzungsverhalten und Porenbildung

Bewertungsskala von 1 (sehr gut) bis 5 (mangelhaft)

st: statisch, sw: schwellend

5.5.5 Bewertung der Untersuchungsergebnisse

Zum Zweck einer übersichtlichen Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen in quantifizierter Form wurde in Tabelle 21 eine numerische Bewertung der Benetzungsverhältnisse zwischen Rißflanken und Reaktionsharz sowie der beobachteten Porenbildung vorgenommen.

Die vorgenommene Bewertung verdeutlicht, daß einerseits trockene sowie karbonatisierte Risse eine ungleich bessere Benetzung ermöglichen als nasse Risse und andererseits das Harzsystem 2 den beiden anderen klar überlegen ist.

Bei nassen Rißoberflächen treten überwiegend Bereiche gestörten Verbundes auf; daneben wurde im allgemeinen eine ausgeprägte Porenbildung innerhalb der Reaktionsharze beobachtet, was ursächlich auf chemischen Reaktionen des noch unvernetzten Harzes mit dem an den Rißflanken haftenden Wasser beruht. Hierdurch wird die Kohäsion nicht nur aufgrund des verringerten Nettoquerschnitts beeinträchtigt, sondern als Folge der gestörten Stöchiometrie von Harz und Härter.

Das Benetzungsverhalten des Harzsystems 2 ist im Falle nasser Rißflanken in Kombination mit schwellender Last und erhöhten Temperaturen zwar besser als das des Harzsystems 1, dennoch rechtfertigen es die bisherigen Erkenntnisse nicht, von einem feuchtigkeitsunempfindlichen Harz zu sprechen.

Das Harzsystem 3 vermag weder hinsichtlich Benetzungsvermögen noch bezüglich der übergroßen Neigung zur Porenbildung zu überzeugen. Darüber hinaus schlägt die verarbeitungsunfreundliche hohe Reaktivität und dementsprechend geringe Topfzeit bei höheren Temperaturen so negativ zu Buche, daß ein Praxiseinsatz zumindest bei diesen Temperaturen kaum erwägenswert erscheint.

6 Zusammenfassung

Die Güte von Rißverpressungen belasteter Stahlbetonbalken wurde unter Variation der Parameter

- Reaktionsharz
- Betonfeuchte
- Betontemperatur
- Alkalität des Betons
- Belastungsart

elektronenoptisch und mechanisch untersucht.

Die Rasterelektronenmikroskopie erwies sich als geeignete Methode zur Betrachtung des mikromorphologischen Harz-Beton-Verbundes. Sie erbrachte den Nachweis, daß bei nassen Rißflächen im Gegensatz zu den mit gutem Erfolg verpreßbaren trockenen bzw. karbonatisierten Rißflanken ein unbefriedigender Verbund erzielt wurde. Eine Schwellbeanspruchung der Risse während des Verpressens und der Aushärtephase wirkte sich in einigen Fällen graduell verschlechternd auf den Verbund aus; die Porosität des Harzes sowie die Anzahl ungefüllter Rißbereiche erhöhten sich dagegen deutlich.

Von den drei verwendeten Reaktionsharzen auf Epoxidharzbasis wies ein feuchteunempfindlich eingestelltes Harzsystem zwar allgemein die besseren Benetzungseigenschaften auf, doch wurden bei nassen Rißflanken auch nur ausreichende Resultate erzielt.

An schwellbeanspruchten Balken ergaben Rißbreitenmessungen während des Verpressens und der anschließenden Aushärtungsphase eine gegen Ende der Aushärtungsreaktion so große Reduzierung der Rißbewegung, daß vom Erreichen eines Zustand-I-ähnlichen Verhaltens gesprochen werden kann.

Die Ergebnisse der elektronenoptischen Untersuchungen stimmen mit den Resultaten von Zugversuchen bezüglich des Einflusses unterschiedlicher Rißflankenzustände weitgehend

überein. Während die Bruchflächen bei verpreßten trockenen und karbonatisierten Rissen ausschließlich im Beton lagen, hielten naßverpreßte Risse der Haftzugbeanspruchung nur selten stand.

7 Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß gegenwärtig selbst mit feuchtigkeitsunempfindlich eingestellten Epoxidharzsystemen das Verbundverhalten zwischen Harz und Rißflanken beim Verpressen nasser Risse nur graduell zu verbessern ist. Dagegen ergaben sich beim Verpressen karbonatisierter Risse keinerlei Probleme.

Da das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig Mitglied im Sachverständigenausschuß "Rißinjektion" des Bundesministers für Verkehr ist und sich das o.g. Merkblatt /1/ gegenwärtig in der Überarbeitung befindet, fließen die gewonnenen Erkenntnisse unmittelbar in die Ausschubarbeit ein. Somit ist eine rasche Umsetzung in die Praxis gewährleistet.